

Leandro Lima Evangelista

**Investigação dos Efeitos do Processamento nas Propriedades
Mecânicas, Elétricas e Magnéticas de Compósitos Magnéticos Moles**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Mestre em
Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Paulo Antônio Pereira
Wendhausen, Dr. -Ing.

Florianópolis
2015

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.**

Evangelista, Leandro Lima
Investigação dos Efeitos do Processamento nas
Propriedades Mecânicas, Elétricas e Magnéticas de Compósitos
Magnéticos Moles / Leandro Lima Evangelista ; orientador,
Paulo Antônio Pereira Wendhausen - Florianópolis, SC, 2016.
124 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. Compósitos
Magnéticos Moles. 3. Somaloy. 4. Otimização de Processo. 5.
Metodologia de Superfície de Resposta. I. Wendhausen, Paulo
Antônio Pereira. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais. III. Título.

Leandro Lima Evangelista

**Investigação dos Efeitos do Processamento nas Propriedades
Mecânicas, Elétricas e Magnéticas de Compósitos Magnéticos Moles**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 12 de fevereiro de 2016.

Prof. Antônio Pedro Novaes de Oliveira, Dr. – Ing.
Coordenador, PGMAT - UFSC

Prof. Paulo A. P. Wendhausen, Dr.- Ing.
Orientador/Presidente, Depto. Eng. Mecânica - UFSC

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando José Gomes Landgraf,
Membro Externo – USP/SP

Prof. Dr. Carlos Henrique Ahrens
Dep. Eng. Mecânica - UFSC

Prof. Dr. Cristiano da Silva Teixeira
Campus Blumenau - UFSC

À minha esposa
Renne de J. T.
Evangelista.

Agradecimentos

Ao Prof. Paulo A. P. Wendhausen pelo suporte nestes desafios em busca de conhecimento e consolidação da minha trajetória profissional.

Aos colegas de trabalho do grupo de materiais magnéticos MAGMA pela colaboração nestes anos, em especial a Fernando Maccari, Bruno Eggert, Frederico Keller, Juliano Baron, Luiz Henrique Justo, Leonardo Ulian Lopes, Cristiano Teixeira e Edson Santos. Agradeço também todos os alunos de iniciação científica com quem tive contato no MAGMA, em especial aqueles que diretamente me auxiliaram em várias atividades durante o mestrado e com quem compartilho grande amizade: Laura Maragno, Daniel Avila, Sewin Horita e Jadson Barbosa.

À empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A., em nome do Eng. Matheus Amorim Carvalho e demais colaboradores do setor de pesquisa e desenvolvimento, pelo grande apoio nas caracterizações contidas nessa dissertação.

À empresa Höganäs AB Brasil, em nome do Sr. Luiz Imparato, que promoveu recursos essenciais para a produção desse trabalho. Agradeço também por toda a informação compartilhada pela equipe técnica da empresa, a qual permitiu um rápido progresso na execução do estudo apresentado nesse documento.

À minha família, pelo apoio e ajuda em todos os momentos para que essa conquista fosse possível.

Por fim, agradeço especialmente à minha esposa e companheira, Renne de Jesus Turibio Evangelista, por seu apoio em todos os momentos e por fazer desse casamento a melhor experiência da minha vida.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica a nossa ignorância.”
John F. Kennedy

RESUMO

Os compósitos magnéticos moles são materiais constituídos de partículas ferromagnéticas revestidas por um isolante elétrico, garantindo alta resistividade elétrica do componente produzido, possibilitando o seu uso em máquinas elétricas operando em uma larga faixa de frequências. O processamento desses materiais compreende uma etapa de compactação do pó precursor, seguida de tratamento térmico para alívio de tensões e aumento de resistência mecânica. A otimização desse processamento depende, no entanto, da frequência de magnetização, nível de indução magnética e carga mecânica aplicada nas condições de operação. O presente trabalho apresenta um processo de otimização e geração de modelos de previsão para as propriedades de perdas magnéticas, resistividade elétrica e resistência à ruptura em flexão de 3 pontos baseado nos parâmetros de processamento desses compósitos. A metodologia de otimização utilizada inclui um planejamento de experimentos do tipo Box-Behnken para estabelecer superfícies de resposta para as propriedades de interesse para o compósito magnético comercial Somaloy® 3P 700. No tocante as perdas magnéticas, os modelos gerados são bastante coerentes e precisos para a maioria dos casos analisados (0,1 a 1,5 T / 50 a 1000 Hz) e os pontos ótimos em termos da pressão de compactação e tempo de patamar na temperatura máxima do tratamento térmico mantiveram-se constantes respectivamente em 900 MPa e em 15 minutos, já a temperatura máxima de tratamento deve ser diminuída à medida que a frequência e a indução máxima são aumentadas. Os modelos gerados para resistividade elétrica e resistência mecânica, embora tenham apresentado intervalos de predição muito largos, demonstraram ser coerentes com os dados medidos e possibilitaram identificar os pontos ótimos de processamento. Através dos modelos percebeu-se que a resistividade elétrica é bastante diminuída com o aumento da temperatura e que a maior resistência mecânica prevista é de $82,7 \pm 13,5$ MPa para uma pressão de compactação de 700 MPa, temperatura máxima de 550 °C e tempo de patamar de 15 minutos. Os resultados revelam a necessidade de controlar o processamento de forma a balancear as propriedades de interesse, que é uma tarefa bastante facilitada graças aos modelos de previsão gerados nesse trabalho para o compósito comercial Somaloy® 3P 700.

PALAVRAS CHAVE: Compósitos Magnéticos Moles, Somaloy®, Otimização de Processamento, Metodologia de Superfície de resposta

ABSTRACT

Soft magnetic composites are constituted of ferromagnetic particles coated by an electrically insulating layer granting high electrical resistivity of the produced part, which allows its use in electrical machines operating in a wide range of frequencies. Its material processing comprehends a compaction of the precursor powder, followed by a heat treatment for stress relieving and mechanical strength enhancement. The optimization for this processing depends on operating conditions, such as magnetizing frequency, magnetic induction level and applied mechanical loads. This work brings a study of optimizing and generating prediction models for magnetic losses, electrical resistivity and transverse rupture strength, based on the processing parameters. The proposed method includes a Box-Behnken design of experiments in order to establish response surfaces for the previous cited properties, and that method was tested in this work using the commercially available soft magnetic composite Somaloy® 3P 700. Regarding the magnetic losses, the generated models were consistent with measured data and accurate for most of the analyzed measuring conditions (0.1 to 1.5 T / 50 to 1000 Hz) and the optimal processing points concerning pressing pressure and soaking time were observed as constants at 900 MPa and 15 minutes, respectively. However, the optimal maximum temperature of heat treatment decreases as the frequency and maximum magnetic induction are increased. Even though presenting large prediction intervals, the generated models concerning the electrical resistivity and transverse rupture strength proved to be consistent with the measured data, allowing to identify the optimal processing parameters. By analysis of the models, it was observed that the electrical resistivity suffers a quick decrease as the temperature is increased. Moreover, the highest forecasted transverse rupture strength (82.7 ± 13.5 MPa) is achieved for the processing condition of pressing pressure of 700 MPa, maximum temperature of 550 °C and soaking time of 15 minutes. The results of this work reveal the need of controlling the processing as a way to balance the final properties of the produced part, which is now an easier task due to the prediction models presented in this work for the commercial composite Somaloy® 3P 700.

KEYWORDS: Soft Magnetic Composite, Somaloy®, Process Optimizing, Response Surface Methodology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de histerese BxH para materiais magnéticos moles.	5
Figura 2 – Representação esquemática de domínios magnéticos dentro de um material policristalino.	7
Figura 3 - Caminhos de corrente parasita em compósitos magnéticos moles.	9
Figura 4 - Áreas de aplicação para ferrites, chapas de aço elétrico e compósitos magnéticos moles.	14
Figura 5 - Representação esquemática dos constituintes de um compósito magnético mole.....	15
Figura 6 - Conceitos para redução das perdas de energia em compósitos magnéticos moles.	17
Figura 7 - Fluxograma de produção de componentes a base de compósitos magnéticos moles.	18
Figura 8 - Dependência das perdas em relação à indução máxima para frequência de 50 Hz em distintas temperaturas de tratamento térmico.	19
Figura 9 - Perdas magnéticas versus frequência de excitação para $B_m = 0,7$ T.	19
Figura 10 - Medições de magnetização com campo aplicado em amostra Somaloy® 500 + Kenolube após tratamento térmico.	20
Figura 11 - Típica medição de efeito Barkhausen para Somaloy® 500 + Kenolube após compactação e tratamento térmico, demonstrando efeitos dos regimes de compactação.	21
Figura 12 - Típica medição de efeito Barkhausen para Somaloy® 500 + Kenolube após compactação e tratamento térmico, demonstrando efeitos dos regimes de compactação.	21

Figura 13 - Resistividade elétrica em função da temperatura de tratamento térmico de amostras de Somaloy® 500 contendo Kenolube (Ken) e LB1 (LB1) como lubrificante.22

Figura 14 - Resistividade elétrica em função da pressão de compactação antes e depois do tratamento térmico de amostras de Somaloy® 500 contendo Kenolube (Ken) e LB1 (LB1) como lubrificante.....22

Figura 15 - Resistividade elétrica de amostras compactadas de pó de ferro tratados com 0,1% e 0,2% (Mix 1A e Mix 2A, respectivamente) em peso de ácido fosfórico, tratadas em N₂ por 1 hora.....23

Figura 16 - Diagrama de energia livre de Gibbs para possíveis interações entre o recobrimento de fosfato e o núcleo de ferro. ...24

Figura 17 - Superfícies de fratura de componentes à base de Somaloy® 500 tratados ao ar nas temperaturas de 400, 500 e 600 °C (da esquerda para direita).24

Figura 18 - (a) Evidência da presença de óxido na superfície de amostras de Somaloy® 500 + Kenolube após tratamento térmico e (b) detalhe da microestrutura da magnetita (Fe₃O₄).25

Figura 19 – Difrátograma de raios X de amostra de Somaloy® + Kenolube após tratamento térmico.25

Figura 20 - Módulo de elasticidade de amostras de Somaloy 500 com distintas densidades a verde e tratadas em diferentes temperaturas.26

Figura 21 - Resistência à ruptura de amostras de Somaloy® 700 + Vitroperm em diferentes composições e atmosferas de tratamento térmico.27

Figura 22 - Gráfico de curvas de nível do rendimento, como uma função do tempo e temperatura de reação, ilustrando um experimento de otimização.....28

Figura 23 - Ajuste linear (a) e quadrático (b) de dados.....	29
Figura 24 - Representação esquemática de distribuição dos pontos dos planejamentos: fatorial completo, composto central e Box-Behnken para 3 fatores e eficiência relativa em termos de números de corridas.....	30
Figura 25 - Propriedades típicas de diferentes classes da família Somaloy®.....	33
Figura 26 - Tratamento térmico Curto (a) e Longo (b) propostos para esse trabalho.....	35
Figura 27 - Foto do ferramental e dimensões da amostra produzida no formato de barra.....	35
Figura 28 - Foto do ferramental e dimensões da amostra produzida no formato de anel.....	35
Figura 29 - Amostra na forma de anel de Rowland destacando os terminais dos bobinamentos primário e secundário.....	39
Figura 30 - Bancada de testes de aços elétricos MPG 100 D da Brockhaus.....	40
Figura 31 - Aparato para medição de resistividade elétrica via método de quatro pontas.....	41
Figura 32 - Representação esquemática do funcionamento do ensaio de medição de resistividade pelo método de quatro pontas.....	41
Figura 33 - Máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL3000.....	42
Figura 34 - Representação esquemática do ensaio de flexão de 3 pontos.....	42
Figura 35 - Distribuição dos pontos individuais relativo às perdas magnéticas (1,0 T – 60 Hz) das amostras submetidas ao tratamento Curto.....	43

Figura 36 - Distribuição dos pontos individuais relativo às perdas magnéticas (1,0 T – 60 Hz) das amostras submetidas ao tratamento Longo.	44
Figura 37 - Representação gráfica do modelo ótimo de perdas (1,0 T/ 60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Longo.	48
Figura 38 - Representação gráfica do modelo ótimo de perdas (1,0 T/ 60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Curto.	49
Figura 39 - Coeficientes de regressão (a) S, (b) R^2 , (c) R^2_{adj} e (d) R^2_{pred} dos modelos ótimos de perdas magnéticas para amostras submetidas ao tratamento Curto.	51
Figura 40 - Razão entre erro padrão de regressão e perdas ótimas para todas as condições de medição para as amostras submetidas ao tratamento Curto.	52
Figura 41 - Coeficientes de regressão (a) S, (b) R^2 , (c) R^2_{adj} e (d) R^2_{pred} dos modelos ótimos de perdas magnéticas para amostras submetidas ao tratamento Longo.	53
Figura 42- Razão entre erro padrão de regressão e perdas ótimas para todas as condições de medição para as amostras submetidas ao tratamento Longo.	53
Figura 43 - (a) Perdas estimadas na condição otimizada para amostras submetidas ao tratamento Curto e (b) Pressão de Compactação, (c) Temperatura Máxima e (d) Tempo de Patamar correspondente ao processamento otimizado.	54
Figura 44 - (a) Perdas estimadas na condição otimizada para amostras submetidas ao tratamento Longo e (b) Pressão de Compactação, (c) Temperatura Máxima e (d) Tempo de Patamar correspondente ao processamento otimizado.	56
Figura 45 - Razão entre perdas ótimas dos dois tipos de tratamento térmico.	57

Figura 46 - Distribuição dos pontos individuais relativo à resistividade elétrica das amostras submetidas ao tratamento Curto.	58
Figura 47 - Distribuição dos pontos individuais relativo à resistividade elétrica das amostras submetidas ao tratamento Longo.....	58
Figura 48 - Representação gráfica do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Curto.....	60
Figura 49 - Representação gráfica do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Longo.	61
Figura 50 - Distribuição dos pontos individuais relativo a (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa das amostras submetidas ao tratamento Curto.....	62
Figura 51 - Representação gráfica do modelo ótimo de (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Curto.	63
Figura 52- Superfícies de fratura das amostras após ensaio de flexão 3 pontos sobrepostas ao gráfico de curvas de nível do modelo de resistência a ruptura para amostras submetidas ao tratamento Curto.	64
Figura 53 - Distribuição dos pontos individuais relativo a (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa das amostras submetidas ao tratamento Longo.	65
Figura 54 - Representação gráfica do modelo ótimo de (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Longo.	66
Figura 55 - Superfícies de fratura das amostras após ensaio de flexão 3 pontos sobrepostas ao gráfico de curvas de nível do modelo de resistência a ruptura para amostras submetidas ao tratamento Longo.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dependências dos parâmetros com a composição e processamento.....	16
Tabela 2 – Propriedades típicas de componentes à base de Somaloy® 3P 700 produzidos por compactação a morno seguido de tratamento térmico com vapor.	34
Tabela 3 - Variáveis de processamento e respectivos níveis que foram estudados nesse trabalho.	34
Tabela 4 - Corridas do planejamento de experimentos executado com respectivos níveis dos fatores.	37
Tabela 5 - Equação e coeficientes do modelo de perdas (1,0 T/60 Hz) utilizando todos os possíveis termos para amostras do tratamento Longo.....	46
Tabela 6 - Efeitos e P-valores dos termos usados na regressão para modelamento das perdas (1,0T/60Hz) para amostras submetidas ao tratamento Longo.	46
Tabela 7 - Coeficientes dos modelos de regressão para perda magnéticas (1,0 T/ 60 Hz) após a retirada consecutiva dos termos com altos P-Valores para amostras submetidas ao tratamento Longo.	47
Tabela 8 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de perdas (1,0 T/60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Longo.	47
Tabela 9 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de perdas (1,0 T/60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Curto.	48
Tabela 10 - Intervalos de predição de perdas magnéticas ótimas (1,0 T/ 60 Hz) e conjunto de parâmetros que levam à essa condição. ...	50
Tabela 11 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Curto.....	59

Tabela 12 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Longo.60

Tabela 13 - Equações e coeficientes dos modelos ótimos de resistência a ruptura e variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Curto.....63

Tabela 14 - Equações e coeficientes dos modelos ótimos de resistência a ruptura e variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Longo.66

Tabela 15 - Intervalo de predição no ponto ótimo de resistência a ruptura e conjunto de parâmetros que levam à essa condição para amostras submetidas ao tratamento Longo.66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

H	Campo magnético aplicado	[kA/m]
B	Campo magnético induzido	[T]
μ	Permeabilidade relativa	
B_m	Campo magnético induzido máximo	[T]
<i>f</i>	Frequência de magnetização	[Hz]
P_H	Perdas por histerese	[W/kg]
P_{cp}	Perdas por corrente parasita	[W/kg]
P_{exc}	Perdas anômalas	[W/kg]
P_{total}	Perdas magnéticas totais	[W/kg]
ρ_R	Resistividade elétrica	[Ω .m]
σ_{3p}	Resistência a ruptura em flexão de 3 pontos	[MPa]
P	Pressão de compactação	[MPa]
T	Temperatura máxima de tratamento térmico	[°C]
t	Tempo de patamar na temperatura máxima	minutos

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	OBJETIVOS.....	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	HISTERESE E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	5
2.2.	DOMÍNIOS MAGNÉTICOS	6
2.3.	PERDAS DE ENERGIA EM CAMPOS ALTERNADOS	8
2.4.	MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES	12
2.5.	COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MOLES	14
2.6.	SOMALLOY®	17
2.6.1.	<i>Propriedades Magnéticas</i>	18
2.6.2.	<i>Resistividade Elétrica</i>	22
2.6.3.	<i>Resistência Mecânica e Microestrutura</i>	24
2.7.	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E OTIMIZAÇÃO	27
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1.	SOMALLOY® 3P 700 E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	33
3.1.1.	<i>Planejamento de Experimentos</i>	36
3.1.2.	<i>Programas Computacionais</i>	38
3.2.	MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS.....	38
3.3.	MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA	40
3.4.	MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA.....	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1.	PERDAS MAGNÉTICAS.....	43
4.1.1.	<i>Perdas magnéticas – 1,0 T / 60 Hz</i>	43
4.1.2.	<i>Perdas magnéticas – Resultados otimizados</i>	50
4.2.	RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	57
4.3.	RESISTÊNCIA A RUPTURA EM FLEXÃO DE 3 PONTOS.....	62
5.	CONCLUSÕES	69
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
	REFERÊNCIAS.....	75
	APÊNDICE A – Superfícies de Resposta para Perdas Magnéticas	79
	APÊNDICE B – Resultados Otimizados para Perdas Magnéticas.....	91

1. INTRODUÇÃO

O modo acelerado do desenvolvimento humano e a escassez de recursos naturais tem conduzido à utilização de fontes de energia renováveis e um aumento na preocupação em se obter uma maior eficiência em todo o ciclo de vida energético. Isso acarretou em um considerável aumento das pesquisas visando a melhoria da performance de dispositivos relacionados com a geração, o condicionamento, a conversão e o transporte de energia elétrica (GUTFLEISCH et al., 2011).

Praticamente onipresentes em aplicações energéticas, os materiais magnéticos representam parte importante desse desenvolvimento. Nesse contexto estão contidos os materiais que apresentam a capacidade de amplificar a intensidade de um campo magnético ao qual são submetidos, os chamados materiais magnéticos moles. Esses materiais são utilizados em uma grande gama de dispositivos como solenóides, dispositivos de controle de fluxo, sistemas de freio ABS, controle de tração positiva, relés, atuadores e motores elétricos (LALL, 1992).

Como exemplos de materiais magnéticos moles, pode-se citar os aços elétricos, os materiais sinterizados a base de ferro, as ferrites moles e os materiais compósitos magnéticos moles. Os aços elétricos são os mais comumente utilizados, no entanto, possuem limitantes para a aplicação em altas frequências devido à sua baixa resistividade elétrica, a qual acarreta grandes perdas de energia por geração de corrente parasita. Uma limitação semelhante também é encontrada para os componentes sinterizados a base de ferro. Já as ferrites moles apresentam pequena influência da frequência em suas propriedades magnéticas. No entanto, as ferrites moles apresentam baixa densidade de fluxo magnético. Por fim, os compósitos magnéticos moles apresentam excelente performance em frequências mais altas em relação aos aços elétricos e uma densidade de fluxo maior do que as ferrites (ANDERSSON, 2009; BOEHM; HAHN, 2012).

Além disso, esses compósitos, formados por partículas ferromagnéticas revestidas por uma camada isolante elétrica, apresentam características isotrópicas, permitindo assim o carregamento de fluxo magnético em três dimensões, diferentemente das chapas de aço elétrico que são limitadas a duas dimensões (ANDERSSON, 2009; BOEHM; HAHN, 2012). Essas características permitem a miniaturização de dispositivos contendo componentes baseados nos compósitos magnéticos moles. É ainda importante mencionar que o processamento de componentes baseados nessa tecnologia seguem técnicas da metalurgia do pó, gerando componentes com a geometria final ou com necessidades

de apenas pequenas alterações, possibilitando alta produtividade e um menor desperdício de material (ANDERSSON, 2009; CREMONEZI; LOPES, 2009; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

Os compósitos magnéticos moles são, portanto, uma alternativa interessante para diversas máquinas elétricas, sendo possível o seu uso em uma vasta gama de aplicações. Para tanto, as propriedades desses materiais, as quais podem ser ajustadas através do processamento desses componentes, podem ser otimizadas para cada aplicação específica em termos de frequência de magnetização, nível de indução magnética máxima e cargas mecânicas aplicadas ao componente.

Apesar de haver informações substanciais sobre os impactos do processamento nas propriedades de compósitos magnéticos moles reportadas na literatura (GILBERT et al., 2004; NOLAN, 2009; OIKONOMOU et al., 2014; ŚLUSAREK et al., 2015), não foi encontrada uma metodologia definida para esses materiais no sentido de quantificar os efeitos das variáveis de processamento e suas interações de forma a prever resultados com base nos parâmetros de processamento.

Dessa forma, esse trabalho propõe o uso da metodologia de superfície de resposta para definição desses modelos de previsão das propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas de compósitos magnéticos moles (ANDERSON; WHITCOMB, 2005; MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2011). Essa metodologia foi avaliada nesse estudo utilizando o compósito magnético mole comercial Somaloy® 3P 700 e, como resultado dessa avaliação, os modelos gerados poderão ser utilizados para a otimização do processamento voltado à diferentes situações de uso em termos de frequência, nível de indução e resistência mecânica.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é investigar os efeitos do processamento nas propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas de compósitos magnéticos moles através do uso da metodologia de superfície de resposta com vista a otimizar o processamento para a fabricação de componentes destinados a diferentes condições de aplicação e a predição dos valores das propriedades de interesse baseado nas condições de processamento.

Objetivos Específicos

- Geração de modelos que quantifiquem as propriedades de interesse como uma resposta ao processamento do compósito magnético mole comercial Somaloy® 3P 700.
- Avaliação dos modelos gerados em relação à qualidade do modelo na previsão de novas observações e largura dos intervalos de predição.
- Utilização dos modelos gerados para definição das melhores condições de processamento para o Somaloy® 3P 700.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTERESE E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

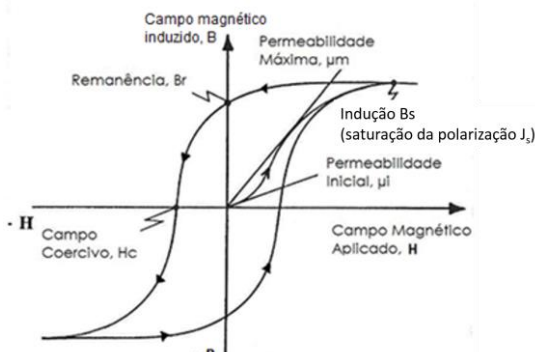
Materiais ferromagnéticos, quando submetidos a um campo eletromagnético H , intensificam o campo original aplicado. Dessa forma, diz-se que o campo original induziu um novo e mais intenso campo magnético, B , no interior do sólido, tal qual a Equação 1:

$$B = \mu_0 H + J \quad (1)$$

No sistema internacional de unidades, o campo induzido B é dado em T (tesla), o campo aplicado H é expresso em A/m (amperes por metro), a permeabilidade do vácuo μ_0 é uma constante de valor $4\pi 10^{-7}$ T.m/A, e J é a polarização, expressa em T (tesla), e que representa a parcela do campo gerada pelo material.

A aplicação de materiais ferromagnéticos depende certamente das suas propriedades magnéticas, as quais são comumente avaliadas através de uma curva de histerese como a apresentada na Figura 1 para o caso de materiais magnéticos moles.

Figura 1 - Curva de histerese $B \times H$ para materiais magnéticos moles.



Fonte: Traduzido e adaptado de (LALL, 1992).

Para gerar uma curva de histerese, um campo H é aplicado ao material ferromagnético e um campo induzido B é medido, plotando-se a relação entre as duas grandezas. Para materiais magnéticos moles, B é bastante maior que H , por isso o eixo B apresenta-se condensado no esquema da Figura 1 com o intuito de facilitar a visualização.

A razão entre o campo induzido e o campo aplicado (B/H) é denominada permeabilidade relativa (μ). Inicialmente, um pequeno campo aplicado H gera um grande aumento no campo induzido B , essa permeabilidade inicial μ_i é usualmente bastante difícil de medir devido ao fato de que a inclinação inicial da curva é muito sensível ao aparato de teste (LALL, 1992). Portanto, é mais comum se referir a permeabilidade máxima, μ_m , que é a inclinação da semi-reta que liga a origem à tangente do joelho da curva $B \times H$ como apresentado na Figura 1.

A medida que H é aumentado, o efeito de amplificação se torna menor até atingir um ponto de saturação J_s associado a uma indução apresentada como B_s na Figura 1, a partir do qual um campo externo aplicado não mais terá efeito de polarização no material. É importante mencionar que B_s é por vezes chamado de indução de saturação, no entanto, este termo é equivocado ao passo que a indução magnética B continua a crescer pelo aumento do campo externo H , não havendo dessa forma a estagnação ou a saturação do campo induzido, mas sim da parcela do campo associado a polarização do material J , como apresentado na Equação 1.

Depois de J_s ser atingido e o valor de H ser reduzido, a curva segue um caminho diferente do inicial, por isso o termo histerese. Com um campo aplicado reduzido a zero, tem-se uma indução residual B_r , chamada de remanência. Para novamente levar o material a condição de indução magnética igual a 0, um campo aplicado de valor H_c , chamado de campo coercivo, e de sentido oposto ao campo induzido deve ser aplicado. Com o aumento do campo aplicado para valores maiores que H_c , tem-se a magnetização no sentido oposto ao inicial, mas de mesma magnitude de polarização. E finalmente, a retirada do campo aplicado e posterior aumento de H no sentido inicial fecha o ciclo de histerese, obtendo-se uma curva simétrica.

2.2. DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

Um material ferromagnético apresenta o comportamento explicado na seção anterior pela soma de dois fatores: a presença de um momento magnético líquido atômico e a interação de troca.

O momento magnético líquido está presente apenas em alguns elementos e sua presença depende da configuração eletrônica e da disposição dos spins na camada incompleta. Elementos como ferro, níquel e manganês, por exemplo, apresentam momento magnético líquido. Enquanto que a interação de troca é um fenômeno relacionado com o raio atômico e o raio da camada incompleta, que força o momento

magnético de um átomo a se alinhar com o momento do átomo vizinho, provocando uma ordenação de longo alcance (CULLITY; GRAHAM, 2008; LALL, 1992). Portanto, dentre os elementos que possuem momento magnético líquido, apenas alguns possuem o fenômeno da interação de troca que provocará o alinhamento dos momentos. De fato, apenas o ferro, o níquel, o cobalto e o gadolínio apresentam a combinação destes fenômenos dentre os elementos puros em temperaturas próximas da temperatura ambiente.

Em 1906, o cientista francês Pierre Weiss introduziu dois notáveis conceitos que permitiam um melhor entendimento dos materiais ferromagnéticos (LALL, 1992). O primeiro deles é que os materiais ferromagnéticos são “magnetizados espontaneamente”, mesmo na ausência de um campo externo. O segundo conceito diz que esses materiais são divididos em pequenas regiões, chamados domínios magnéticos, que são separadas por paredes de domínios (LALL, 1992).

A teoria proposta por Pierre Weiss é a de que, para minimizar a energia magnetostática, cada domínio apresenta-se orientado na direção fácil, mas em sentido oposto ao domínio vizinho. Desse modo, a indução de cada domínio anula a do vizinho, provocando indução nula quando se considera todo o material. A Figura 2 mostra um esquema da estrutura de domínios magnéticos em um material policristalino. Como a orientação cristalográfica varia de grão para grão, a direção de fácil magnetização também acompanha essa variação (LALL, 1992).

Figura 2 – Representação esquemática de domínios magnéticos dentro de um material policristalino.



Fonte: (GORKUNOV; DRAGOSHANSKY, 2000).

A teoria dos domínios explica o processo de magnetização e desmagnetização que se observa na curva de histerese do material. Quando um campo magnético é aplicado em um material ferromagnético na condição desmagnetizada, este campo inicialmente fará com que os domínios alinhados na sua direção cresçam em detrimento daqueles que estão em outras direções. Este crescimento se dá através do movimento das paredes de domínio (LALL, 1992). A medida que a intensidade do campo externo aplicado aumenta, os domínios remanescentes são forçados a rotacionar de forma que se tornem alinhados com o campo aplicado (LALL, 1992). No processo de desmagnetização a resposta do material dependerá, dentre outros fatores, da mobilidade da parede de domínio e da presença de domínios na direção reversa.

2.3. PERDAS DE ENERGIA EM CAMPOS ALTERNADOS

Uma das mais importantes qualidades de materiais magnéticos moles é a habilidade de responder a campos externos de baixa magnitude. Pela definição, o melhor material magnético mole possui baixa coercividade e alta permeabilidade. Quando campos magnéticos alternados são aplicados ao material, introduz-se o fator tempo, usualmente expresso em frequência do ciclo, produzindo uma resposta dinâmica do material. Essa resposta é influenciada por uma série de fatores como estrutura cristalina, defeitos internos, resistividade elétrica, dimensões e frequência de testes (LALL, 1992).

O que de fato ocorre é a perda de parte da energia aplicada para atingir determinado nível de indução magnética em um campo alternado em uma frequência definida. Essa energia despendida é denominada de perdas, que de forma geral é convertida em calor. Essas perdas estão atreladas a diferentes causas, de forma que se pode expressar as perdas totais como soma de perdas por histerese, perdas por correntes parasita (ou de Foucault) e perdas anômalas (KOLLÁR et al., 2013; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

A energia dissipada (W_h) associada as perdas por histerese representam a quantia de energia dissipada no material magnético durante um ciclo magnetização (KOLLÁR et al., 2013). Esse tipo de perda está relacionado com a dificuldade na movimentação das paredes de domínio durante a magnetização/desmagnetização do material. A mobilidade das paredes de domínio pode ser prejudicada pela presença de imperfeições, tensões internas e impurezas no material, que atuam como ancoradores de parede de domínio (KOLLÁR et al., 2013; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). Esses defeitos causam, portanto, o aumento da

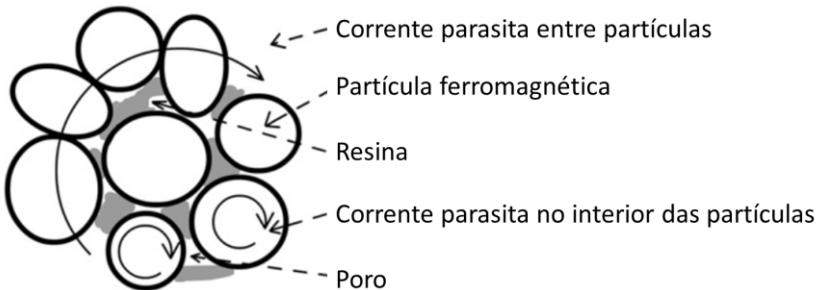
energia despendida para que a parede de domínio passe por essas barreiras e devem ser evitados para diminuir as perdas histeréticas. De uma maneira geral, as perdas totais, para aplicações em baixa frequência, são basicamente dominadas pelas perdas histeréticas (P_h , em W/kg), que são descritas pela relação mostrada na Equação 2,

$$P_h = W_h \frac{f}{\rho} = K_h B_m^x f \quad (2)$$

onde f é a frequência, ρ é a densidade, K_h e x são parâmetros que dependem do material e incluem os aspectos estruturais que afetam o ancoramento das paredes de domínio e o campo coercivo e B_m é a indução máxima.

Já as perdas por corrente parasita ou correntes de Foucault são causadas por correntes parasitas induzidas em qualquer material condutor submetido a um fluxo magnético variável. Em materiais compósitos magnéticos moles existem dois diferentes caminhos para as correntes parasitas: no interior das partículas e entre as partículas que compõem o material, como ilustrado na Figura 3. Para compósitos que possuem bom isolamento entre as partículas essas correntes ficarão mais limitadas no interior das partículas metálicas, enquanto que para partículas não isoladas ou com filme isolante degradado as correntes parasitas tendem a circular entre as partículas (KOLLÁR et al., 2013).

Figura 3 - Caminhos de corrente parasita em compósitos magnéticos moles.



Fonte: Traduzido de (KOLLÁR et al., 2013).

O comportamento de perdas causadas por corrente parasitas que ocorre entre partículas (P_{cp}^{inter} , em W/kg) para compósitos magnéticos moles é retratado pela Equação 3 (KOLLÁR et al., 2013).

$$P_{cp}^{inter} = \frac{(\pi d_{ef} B_m)^2}{\beta \rho_R \rho} f^2 \quad (3)$$

Onde d_{ef} é a dimensão efetiva em relação à corrente parasita, que para bons condutores de eletricidade se traduz na própria espessura da amostra; B_m é a indução máxima, f é a frequência de teste, ρ_R é a resistividade elétrica da amostra, ρ é a densidade da amostra e β é um coeficiente geométrico, que para seção retangular perpendicular à direção do fluxo magnético é dado pela Equação 4 (KOLLÁR et al., 2013).

$$\beta = \frac{6}{1 - 0,633(w/h) \cdot \tanh(1,58 h/w)} \quad (4)$$

Já as perdas causadas pelas correntes parasitas confinadas no interior das partículas ferromagnéticas (P_{cp}^{intra} , em W/kg), considerando partículas esféricas sob indução magnética senoidal, são definidas pela Equação 5 (KOLLÁR et al., 2013).

$$P_{cp}^{intra} = \frac{(\pi d B_m)^2}{20 \rho_N \rho} f^2 \quad (5)$$

Onde d é o diâmetro das partículas, ρ é a densidade e ρ_N é a resistividade elétrica do material que compõe o núcleo da partícula ferromagnética, isto é, desconsiderando possíveis recobrimentos isolantes na superfície da partícula.

Finalmente, as perdas anômalas (P_{exc}) são causadas pela ramificação e dobramento das paredes de domínio magnético. De acordo com a teoria estatística de Bertotti (BERTOTTI, 1988), o comportamento dos domínios magnéticos durante o processo de magnetização pode ser descrito em termos de n objetos magnéticos simultaneamente ativos. De forma geral, esses objetos magnéticos podem ser associados com o número de paredes de domínio na seção transversal da amostra que se movem simultaneamente durante o processo de magnetização. De acordo com essa teoria, as perdas anômalas surgem da compensação do campo magnético aplicado para sanar a não-homogeneidade dos contra campos gerados pelas correntes parasitas. O número de objetos magnéticos n ,

conforme apresentado em (KOLLÁR et al., 2013), pode ser definido conforme Equação 6.

$$n = \frac{16GSB_m^2 f^2}{P_{exc}\rho_R} \quad (6)$$

Em que G é um coeficiente adimensional de valor igual à 0,1356, S é a área da seção transversal perpendicular ao fluxo magnético, B_m é a indução máxima, f é a frequência, ρ_R é a resistividade elétrica da amostra e P_{exc} é a perda anômala.

Bertotti (BERTOTTI, 1988) afirma que para muitos materiais, o número de objetos magnéticos n obedece uma dependência linear com o campo magnético aplicado em excesso, H_{exc} , conforme a Equação 7.

$$n = n_0 + \frac{H_{exc}}{V_0} \quad (7)$$

Onde n_0 é o número de paredes de domínio ativadas no processo de magnetização utilizando corrente contínua e V_0 representa um parâmetro do material relacionado com o ancoramento local de paredes de domínio.

Considerando a dependência linear da Equação 7, a equação geral das perdas anômalas é dada na Equação 8.

$$P_{exc} = 2B_m f n_0 V_0 \left(\sqrt{1 + \frac{16GSB_m^2 f^2}{n_0^2 V_0 \rho_R}} - 1 \right) \quad (8)$$

No entanto, a dependência de n em relação à H_{exc} não é necessariamente linear para todos os materiais magnéticos (BERTOTTI, 1988), de forma que diferentes dependências de n em relação à H_{exc} leva à diferentes dependências de P_{exc} com a frequência f . Dessa maneira, se na Equação 8, a condição de $(16GSB_m f / \rho_R n_0^2 V_0) \gg 1$ é satisfeita, as perdas anômalas se tornam proporcionais à $f^{3/2}$, o que foi comprovado para chapas de aço elétrico por (BERTOTTI, 1988).

Por outro lado, Kollár et al. demonstrou que para materiais com alta resistividade elétrica e com um alto valor de n_0 , como compósitos

magnéticos moles, a relação $(16GSB_m f / \rho_R n_0^2 V_0) \ll 1$ é válida, permitindo realizar a expansão de Taylor na Equação 8, obtendo a expressão da Equação 9 (KOLLÁR et al., 2013).

$$P_{exc} = \frac{16GSB_m^2 f^2}{n_0 \rho_R} \quad (9)$$

A Equação 9 indica que o número de objetos magnéticos tende a ser constante, ou aumentar de forma pouca expressiva, e que as perdas anômalas dependem da frequência de magnetização da mesma forma que as perdas por corrente parasita para materiais compósitos magnéticos moles (KOLLÁR et al., 2013).

Sabendo que as perdas totais durante o processo de magnetização são advindas de causas diferentes, estratégias e materiais distintos são utilizados para diminuir as perdas para aplicações com definidos valores de indução máxima e frequência de magnetização. Dessa forma, a seleção de materiais magnéticos moles deve especialmente contemplar o comportamento de perdas para dadas condições de uma determinada aplicação.

2.4. MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES

Dentre os materiais magnéticos moles disponíveis comercialmente, as chapas de aço elétrico possuem um papel dominante na produção de máquinas e componentes elétricos, sendo que em 2008 representavam cerca de 95% do mercado de materiais magnéticos utilizados pela indústria (BOEHM; HAHN, 2012). No entanto, a alta condutividade elétrica desses materiais causam uma redução considerável de sua eficiência devido a aparição de correntes parasitas em aplicações em alta frequência, dessa forma, a aplicação do aço elétrico limita-se a aplicações em mais baixa frequência (BOEHM; HAHN, 2012). Além disso, o aço elétrico laminado é capaz apenas de guiar o fluxo magnético eficientemente em apenas duas dimensões, limitando as possibilidades para o projeto de componentes. Por fim, o uso dessas chapas quando no processo de estampagem para produção de estatores e rotores geram um grande desperdício de material (BOEHM; HAHN, 2012).

Os componentes sinterizados a base de Fe, Ni e Co ou combinação desses elementos possuem aplicações principalmente na indústria eletroeletrônica (CREMONEZI, 2009). Esses normalmente apresentam alta densidade de fluxo magnético, a qual é associada com a pureza do

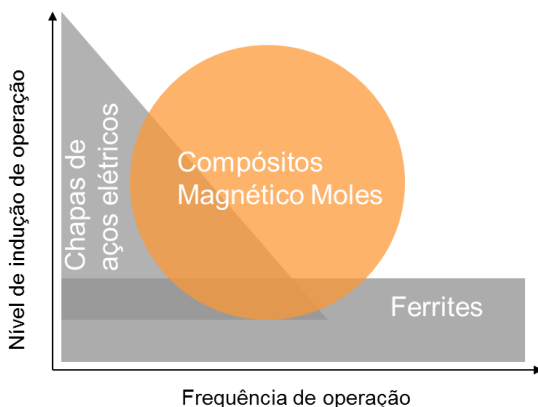
material e densidade da peça sinterizada (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). No entanto, devido à alta condutividade elétrica desses materiais, o uso dos mesmos em aplicações em alta frequência é limitado assim como acontece com os aços elétricos.

Uma alternativa de materiais magnéticos moles, utilizada para alta frequência são as ferrites moles como as ferrites de Mn-Zn e Ni-Zn. Esses materiais apresentam alta resistividade e, portanto, não possuem grandes problemas em aplicações de alta frequência como os aços elétricos. Por outro lado, as ferrites apresentam baixa densidade de fluxo magnético, exigindo, para muitas aplicações, um núcleo ferromagnético muito grande para compensar o baixo nível de indução (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

Por outro lado, os compósitos magnéticos moles possuem uma resistividade consideravelmente maior que a dos aços elétricos e componentes sinterizados, criando a possibilidade de utilização em uma grande faixa de frequências e com uma densidade de fluxo maior que a das ferrites moles (DE WULF et al., 2002; GIMÉNEZ et al., 2006; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007; SLUSAREK et al., 2013). Além disso, esses compósitos apresentam um carregamento de fluxo magnético isotrópico, possibilitando uma gama de formatos para o projetista muito maior do que a oferecida por chapas elétricas, o que pode conduzir à miniaturização e a economia de outros materiais que interagem com os componentes ferromagnéticos como os fios de cobre em rotores (DE WULF et al., 2002; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). Por fim, é ainda válido dizer que por se aproveitar das técnicas de produção da metalurgia do pó, as peças fabricadas com esses materiais compósitos na forma de pó apresentam um baixíssimo desperdício, uma vez que as peças sejam produzidas diretamente na sua geometria final ou com necessidade de pequenas alterações de geometria (BOEHM; HAHN, 2012; CREMONEZI; LOPES, 2009; DE WULF et al., 2002).

A Figura 4 apresenta as zonas de aplicação em termos de frequência de magnetização e nível de indução para os materiais magnéticos moles apresentados anteriormente.

Figura 4 - Áreas de aplicação para ferrites, chapas de aço elétrico e compósitos magnéticos moles.



Fonte: Adaptado de (HÖGANÄS, 2014).

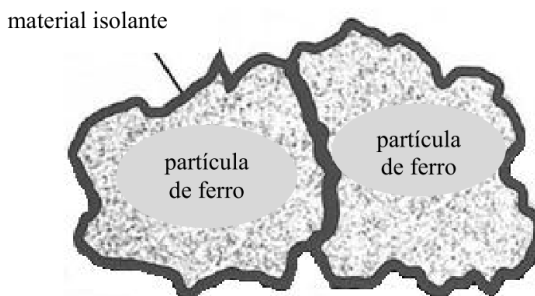
2.5. COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MOLES

Embora a ideia de utilizar pó de ferro combinado com resina seja datada de mais 100 anos atrás (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007), apenas recentemente os compósitos magnéticos moles vieram a substituir os aços elétricos em algumas aplicações (ANDERSSON, 2009; BARBOZA, 2009; BOEHM; HAHN, 2012; CASTRO; RODRIGUES; LANDGRAF, 2004; LIEW et al., 2007; MAGNUSSEN et al., 2004; PENNANDER; JACK, 2003; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). Muito em parte devido ao fato de que o custo por quilograma desse material é superior ao das chapas de aço elétrico. Mas também porque, quando da simples substituição das chapas pelos compósitos magnéticos moles no mesmo projeto, a eficiência da máquina se torna menor. Isso reforça a necessidade e a possibilidade do projetista utilizar o fluxo magnético em três dimensões para tornar esses materiais comercialmente competitivos (PERSSON; NORD; JACK, 2003).

De uma maneira geral, os compósitos magnéticos moles são compostos por partículas de ferro puro ou ligas ferrosas microencapsuladas por um isolante e unidas por uma matriz, tal como representado na Figura 5. Os isolantes podem ser orgânicos (epóxi, acrílico, poliéster, híbridos de epóxi-poliéster, poliuretano) ou inorgânicos (fosfatos, óxidos, sulfatos), e sua função principal é isolar eletricamente as partículas ferromagnéticas, aumentando assim a

resistividade do material e consequentemente diminuindo as perdas por correntes parasitas (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

Figura 5 - Representação esquemática dos constituintes de um compósito magnético mole.



Fonte: (BARBOZA, 2009).

A produção de peças utilizando esses materiais tradicionalmente segue a rota da metalurgia do pó. Sendo assim, o processo inicia com a obtenção do pó de ferro ou liga ferrosa, que pode ser recoberto com um isolante inorgânico ou ainda misturado com resina ligante. A partir daí, dá-se início à compactação uniaxial do pó em uma matriz que dará a forma ao componente e aumentará sua densidade, passando então por um posterior tratamento térmico para alívio de tensões induzidas pela compactação e promover o aumento da resistência mecânica. O aumento da resistência mecânica desses componentes pode se dar por maneiras distintas: cura de uma matriz polimérica (BARBOZA, 2009; RODRIGUES, 2009) ou ainda através da oxidação parcial das partículas de ferro (GILBERT et al., 2004; GIMÉNEZ et al., 2006; OIKONOMOU et al., 2014).

Naturalmente, as propriedades do componente produzido dependerão fortemente dos parâmetros de processamento utilizados em sua produção. De forma resumida, as dependências de cada propriedade em relação a composição e ao processo de fabricação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dependências dos parâmetros com a composição e processamento.

	I	II	III	IV	V
Permeabilidade	↑	↓	↓	↑	↑
Máxima densidade de fluxo	↑	↓	↓	↑	↑
Coercividade	↑	—	—	↑	↓
Resistividade	↓	↑	↑	—	↓
Condutividade térmica	↑	↓	↓	↑	↑
Resistência mecânica	↓	↓	↑	↑↓*	↑**

(I) Aumento do tamanho de partícula; (II) Adição de lubrificante; (III) Adição de ligante; (IV) Aumento da pressão de compactação; (V) Tratamento térmico

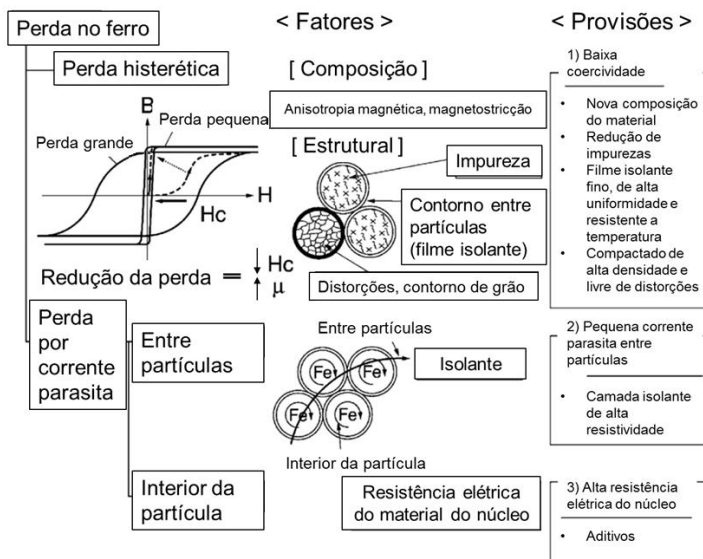
* Em um material contendo ligante a resistência mecânica aumenta com o aumento da compactação, enquanto o comportamento contrário ocorre em um material sem ligante.

** Em um material com resina, a resistência mecânica aumenta até temperaturas próximas de 200 °C devido a uma melhor distribuição da resina. Acima dessa temperatura a resina deteriora e a resistência decai. Em material sem resina tem-se um aumento monótono da resistência com o aumento da temperatura.

Fonte: Traduzido de (SKARRIE, 2001).

Através do entendimento da influência das variáveis apresentadas nas colunas na Tabela 1 nas propriedades finais do material, algumas estratégias utilizadas para diminuir as perdas no ferro foram criadas por diversos pesquisadores. O esquema da Figura 6 reúne algumas das provisões realizadas por alguns pesquisadores, uma vez que se observa os fatores causadores das perdas, com o intuito de melhorar a eficiência dos componentes produzidos a base de compósitos magnéticos moles. Dessa forma, para diminuição das perdas histeréticas é recomendado o uso de materiais com baixa anisotropia magnética e magnetostrição, com alto grau de pureza, um filme isolante fino e que o componente possua o mínimo de tensões residuais possível. Enquanto que para diminuição das perdas por corrente parasita, além das perdas anômalas que também estão ligadas à resistividade elétrica do material, indica-se o uso de uma camada isolante na superfície das partículas com alta resistividade elétrica e em alguns casos até uma resistividade elétrica maior do material do núcleo das partículas.

Figura 6 - Conceitos para redução das perdas de energia em compósitos magnéticos moles.



Fonte: Traduzido de (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

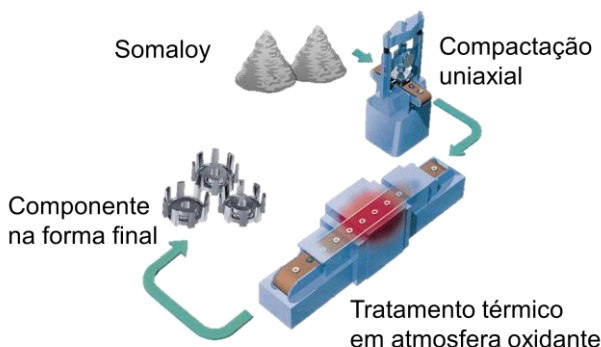
2.6. SOMALOY®

Entre os materiais compósitos magnéticos moles disponíveis no mercado, a linha Somaloy® produzida pela Höganas AB demonstra grande potencial de aplicação em uma vasta gama de frequências (GUO et al., 2006; HOWE, 2005; HULTMAN; YE, 2002; JACK; MECROW; DICKINSON, 1999; PERSSON; NORD; JACK, 2003). Esse material é composto por partículas de ferro puro, com tamanho médio na ordem de 100 μm , recobertas por uma camada de fosfato com espessura na ordem de poucos nanômetros que atua como isolante elétrico entre as partículas metálicas, promovendo um baixo nível de perdas por corrente parasita (SLUSAREK et al., 2013).

O processamento para fabricação de componentes à base de Somaloy® está apresentado na Figura 7. O objetivo da etapa de compactação, além de dar a forma do componente, é produzir um componente com a maior densidade possível, dessa forma reduzindo perdas magnéticas através de regiões de desmagnetização, enquanto provocando o menor dano possível em termos de tensão residual e mantendo a barreira isolante elétrica entre as partículas individuais

(GILBERT et al., 2004). O tratamento térmico, que é realizado sob atmosfera oxidante, subsequente à compactação tem como objetivo diminuir as tensões causadas pela compactação e garantir a resistência mecânica do material através da formação de uma rede de óxidos de ferro entre as partículas compactadas, aumentando o travamento dessas partículas para níveis superiores do que é obtido através da simples compactação (GILBERT et al., 2004; GIMÉNEZ et al., 2006).

Figura 7 - Fluxograma de produção de componentes a base de compósitos magnéticos moles.



Fonte: (HÖGANÄS, 2014)

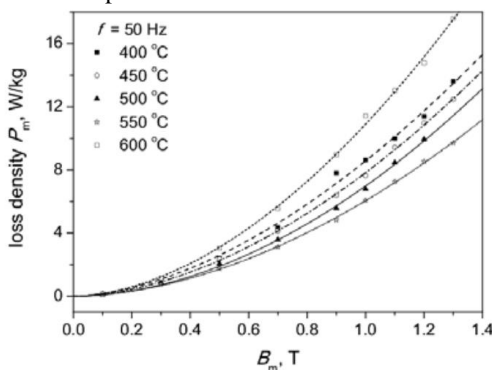
As sub-seções a seguir tratam do estado da arte quanto a relação processamento e propriedades da linha Somaloy® nas temáticas: propriedades magnéticas, resistividade elétrica, resistência mecânica e microestrutura.

2.6.1. Propriedades Magnéticas

Ślusarek et al. (ŚLUSAREK et al., 2015) avaliou o efeito da temperatura de tratamento térmico nas perdas magnéticas de componentes à base de Somaloy® 500 na faixa de 400 a 600 °C, permanecendo nessa temperatura por 30 minutos. Dessa avaliação os autores perceberam que para baixas frequências, o aumento da temperatura de tratamento térmico leva a um maior alívio de tensões causadas pela compactação, acarretando em menores perdas por histerese e consequentemente menores perdas totais. No entanto, esse efeito foi tido como positivo até a temperatura de 550 °C, enquanto que para 600 °C maiores perdas foram obtidas, como apresentado na Figura 8. Esse

comportamento para a temperatura de 600 °C foi associado com a decomposição do isolante inorgânico.

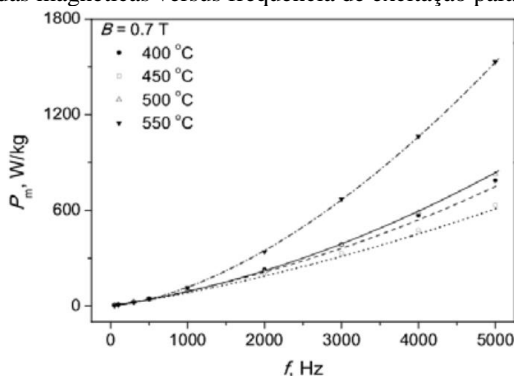
Figura 8 - Dependência das perdas em relação à indução máxima para frequência de 50 Hz em distintas temperaturas de tratamento térmico.



Fonte: (ŚLUSAREK et al., 2015)

No mesmo estudo, quando observado o comportamento das perdas em frequências mais altas, em que as perdas por corrente parasita e perdas anômalas são mais relevantes, a resistividade elétrica deve ser mantida para obter menores perdas totais. Dessa forma, foi encontrado que as menores perdas em altas frequências eram alcançadas quando a amostra era tratada na temperatura de 450 °C (Figura 9), promovendo algum alívio de tensões, porém preservando a integridade da camada isolante elétrica.

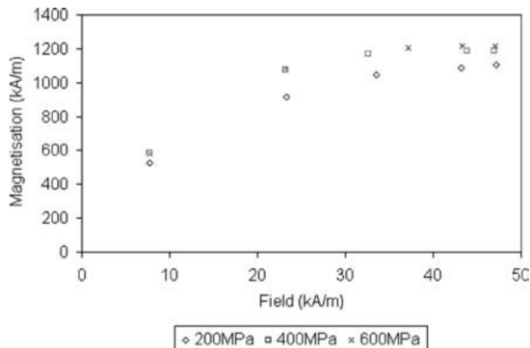
Figura 9 - Perdas magnéticas versus frequência de excitação para $B_m = 0,7$ T.



Fonte: (ŚLUSAREK et al., 2015)

Gilbert et al. (GILBERT et al., 2004) também avaliou o comportamento magnético do Somaloy[®] 500 contendo 0,6% em peso de lubrificante (Kenolube) utilizando diferentes condições de processamento. Esses autores utilizaram dois diferentes processos de compactação utilizando pressões de 200 a 800 MPa com aumento monotônico e também sob condições cíclicas, nesse caso usando pressões de 200 a 600 MPa. Após a compactação, as amostras foram tratadas ao ar em 500 °C por 30 minutos. Nesse estudo, os autores encontraram, via magnetômetro de amostra vibrante, que a magnetização de saturação responde ao aumento de densidade, causado por maiores pressões de compactação, como apresentado na Figura 10.

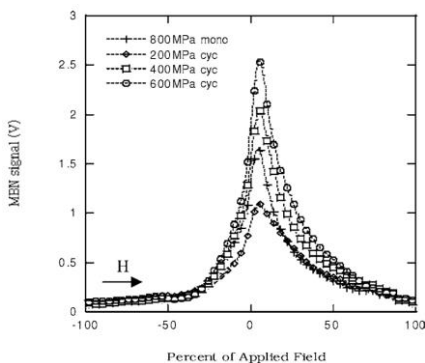
Figura 10 - Medições de magnetização com campo aplicado em amostra Somaloy[®] 500 + Kenolube após tratamento térmico.



Fonte: (GILBERT et al., 2004)

Além do magnetômetro de amostra vibrante, os autores utilizaram medição por efeito Barkhausen para caracterização das amostras. Por essa segunda técnica, eles relatam que um aumento na pressão de compactação causa um aumento no sinal referente ao pico do efeito Barkhausen para os processos de compactação monotônico e cíclico, e que o pico foi maior para o caso de compactação cíclica como mostra a Figura 11. Segundo os autores, esse resultado demonstra que não há vantagem em realizar o processo de compactação cíclico, pois este apenas endurece o núcleo das partículas, o que tornará as perdas por histerese maiores.

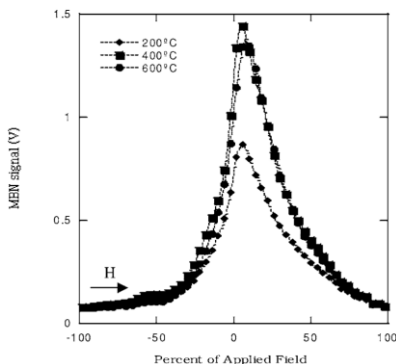
Figura 11 - Típica medição de efeito Barkhausen para Somaloy® 500 + Kenolube após compactação e tratamento térmico, demonstrando efeitos dos regimes de compactação.



Fonte: (GILBERT et al., 2004)

Por fim, os autores ainda relatam que após o tratamento térmico os valores do pico do efeito Barkhausen diminuem e que esses picos alargaram (Figura 12). Com isso eles concluem que o efeito do tratamento térmico no Somaloy® 500 foi muito mais significativo do que o efeito de qualquer uma das variações do processo de compactação. No entanto, os autores adicionam que embora o aumento da temperatura de tratamento térmico possa melhorar as propriedades magnéticas (em termos de perdas histeréticas), ela pode reduzir a resistividade elétrica do material, resultando em maiores perdas anômalas e por corrente parasita.

Figura 12 - Típica medição de efeito Barkhausen para Somaloy® 500 + Kenolube após compactação e tratamento térmico, demonstrando efeitos dos regimes de compactação.

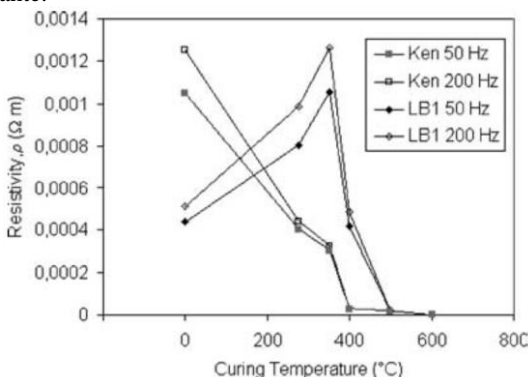


Fonte: (GILBERT et al., 2004)

2.6.2. Resistividade Elétrica

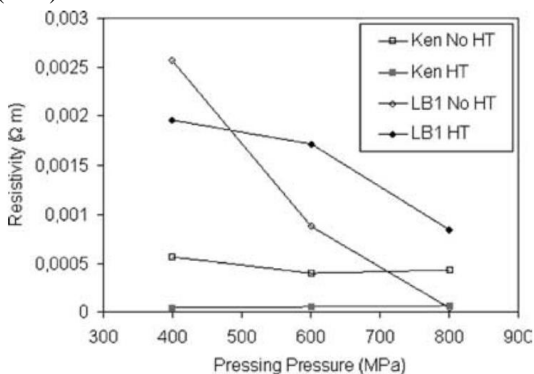
Como exposto por Gilbert et al. (GILBERT et al., 2004), as amostras de Somaloy® 500 + Kenolube apresentam uma redução da resistividade elétrica com o aumento da temperatura (Figura 13) e quase nenhuma alteração dessa propriedade com o aumento da pressão de compactação (Figura 14).

Figura 13 - Resistividade elétrica em função da temperatura de tratamento térmico de amostras de Somaloy® 500 contendo Kenolube (Ken) e LB1 (LB1) como lubrificante.



Fonte: (GILBERT et al., 2004)

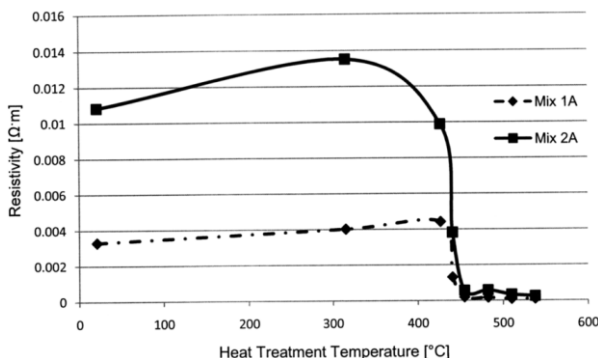
Figura 14 - Resistividade elétrica em função da pressão de compactação antes e depois do tratamento térmico de amostras de Somaloy® 500 contendo Kenolube (Ken) e LB1 (LB1) como lubrificante.



Fonte: (GILBERT et al., 2004)

Além disso, os resultados de trabalho de fosfatização de pó de ferro puro através da mistura desse pó com uma solução de ácido fosfórico e posterior observação da estabilidade da camada de fosfato gerada foi avaliada por Nolan (NOLAN, 2009). Nesse estudo uma diminuição da resistividade elétrica nas temperaturas usuais de tratamento térmico do Somaloy® também é observada (Figura 15).

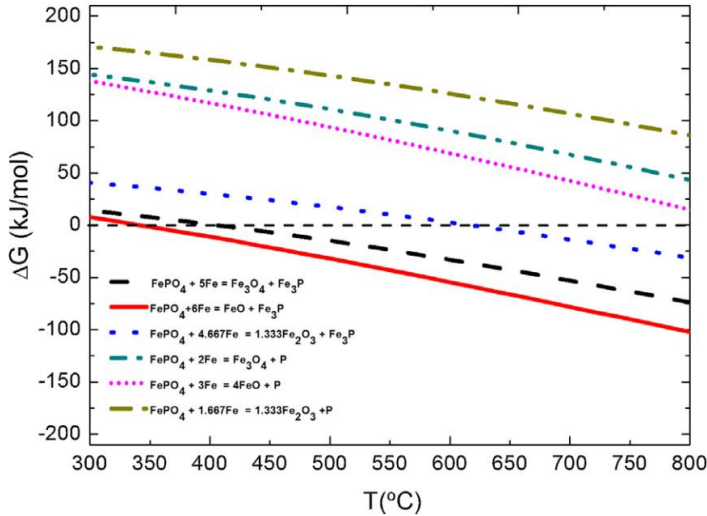
Figura 15 - Resistividade elétrica de amostras compactadas de pó de ferro tratados com 0,1% e 0,2% (Mix 1A e Mix 2A, respectivamente) em peso de ácido fosfórico, tratadas em N₂ por 1 hora.



Fonte: (NOLAN, 2009)

A razão por trás dessa diminuição da resistividade elétrica é a degradação da camada de fosfato que atua como isolante elétrico entre as partículas, como demonstrado experimentalmente por Oikonomou et al. (OIKONOMOU et al., 2014) e previsto pelo diagrama de energia livre de Gibbs da Figura 16. Pelo diagrama percebe-se que nas temperaturas em que os tratamentos do Somaloy® normalmente são realizados o fosfato de ferro (FePO₄) possui tendência a se decompor em FeO e Fe₃P.

Figura 16 - Diagrama de energia livre de Gibbs para possíveis interações entre o recobrimento de fosfato e o núcleo de ferro.

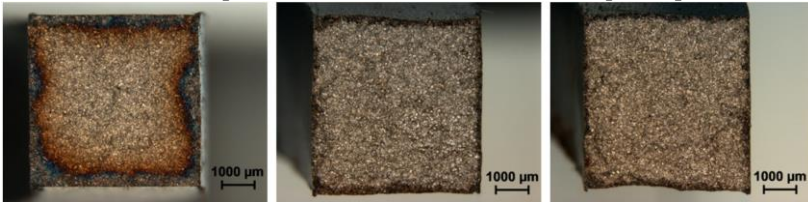


Fonte: (OIKONOMOU et al., 2014)

2.6.3. Resistência Mecânica e Microestrutura

Como mencionado anteriormente, a resistência mecânica de componentes à base de Somaloy[®] está associada a formação de uma rede de óxidos de ferro entre as partículas de ferro, aumentando o ancoramento mecânico entre elas. As fractografias (Figura 17) apresentadas por Oikonomou et al. (OIKONOMOU et al., 2014) mostram que a formação dessa rede fica mais limitada a regiões próximas da superfície da amostra, com pouca alteração do núcleo do componente.

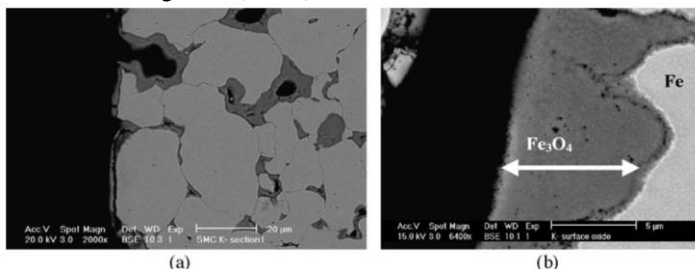
Figura 17 - Superfícies de fratura de componentes à base de Somaloy[®] 500 tratados ao ar nas temperaturas de 400, 500 e 600 °C (da esquerda para direita).



Fonte: (OIKONOMOU et al., 2014)

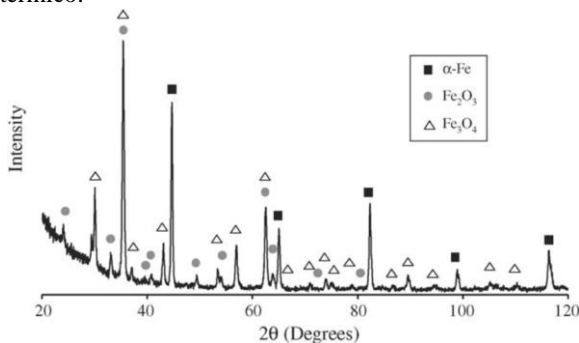
Giménez et al. (GIMÉNEZ et al., 2006) também reportou a presença da rede de óxidos na superfície de amostras de Somaloy® 500 + Kenolube, apresentado na Figura 18. Além disso, a análise de difração de raios X (Figura 19) mostra também uma considerável fração de hematita (Fe_2O_3) além de magnetita (Fe_3O_4), sendo que esse segundo tipo de óxido é mais desejado para a otimização de resistência mecânica e permeabilidade magnética (GILBERT et al., 2004). Uma maior quantidade de magnetita pode ser alcançada através de um tratamento denominado ferroxidação, em que o componente é tratado termicamente sob atmosfera de N_2 contendo vapor de água conforme demonstrado por Gilbert et al. (GILBERT et al., 2004).

Figura 18 - (a) Evidência da presença de óxido na superfície de amostras de Somaloy® 500 + Kenolube após tratamento térmico e (b) detalhe da microestrutura da magnetita (Fe_3O_4).



Fonte: (GIMÉNEZ et al., 2006)

Figura 19 – Difratoograma de raios X de amostra de Somaloy® + Kenolube após tratamento térmico.

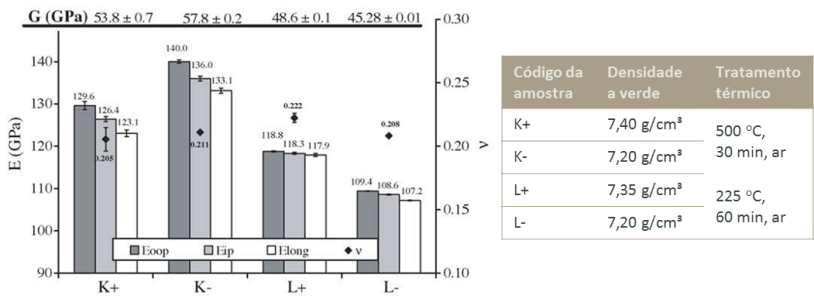


Fonte: (GIMÉNEZ et al., 2006)

O efeito da temperatura de tratamento térmico e pressão de compactação no módulo de elasticidade foi abordado por Giménez et al.

(GIMÉNEZ et al., 2006) e seus resultados estão apresentados na Figura 20. Segundo os autores, amostras tratadas em mais alta temperatura apresentam maior módulo elástico devido à maior cinética de formação de óxidos nessa condição. Além disso, para as amostras tratadas em mais alta temperatura (grupo K), aquelas que possuíam menor densidade a verdade (grupo K-) apresentaram maior rigidez após o tratamento térmico. Os autores atribuem esse resultado ao fato de que a estrutura mais porosa, com maior área de superfície exposta no interior da amostra, permite um maior nível de interação entre a amostra e a atmosfera oxidante, levando a maior formação de óxidos e consequentemente, maior rigidez das amostras.

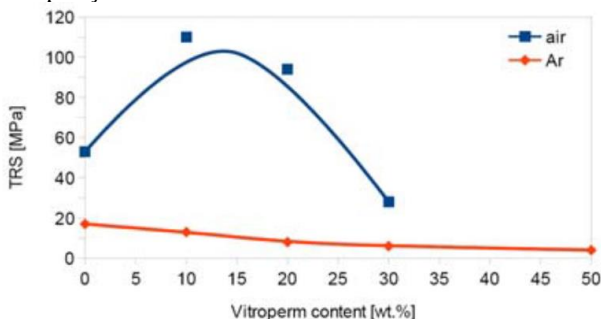
Figura 20 - Módulo de elasticidade de amostras de Somaloy 500 com distintas densidades a verde e tratadas em diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de (GIMÉNEZ et al., 2006)

Por fim, Bureš et al. (BUREŠ et al., 2012) avaliou a resistência mecânica de uma mistura de Somaloy® 700 com Vitroperm®, material magnético mole amorfo comercializado pela Vacuumschmelze, em diferentes proporções e tratados em 530 °C/1 hora com as variações da atmosfera do tratamento: ar e argônio. A resistência mecânica das amostras, avaliada em termos de resistência à ruptura em ensaio de flexão de 3 pontos (*TRS – Transverse Rupture Strength*), está demonstrada na Figura 21. Percebe-se que a resistência mecânica de amostras tratadas ao ar é consideravelmente maior que a das amostras tratadas sob atmosfera de argônio, o que é compatível com o que é reportado como mecanismo de aumento de resistência mecânica do Somaloy®. Além disso, a adição de Vitroperm mostrou-se positiva para a resistência mecânica inicialmente, atingindo um máximo para a amostra com 10% em peso de Vitroperm, no entanto, nada foi reportado em relação às propriedades magnéticas dessas amostras.

Figura 21 - Resistência à ruptura de amostras de Somaloy® 700 + Vitroperm em diferentes composições e atmosferas de tratamento térmico.



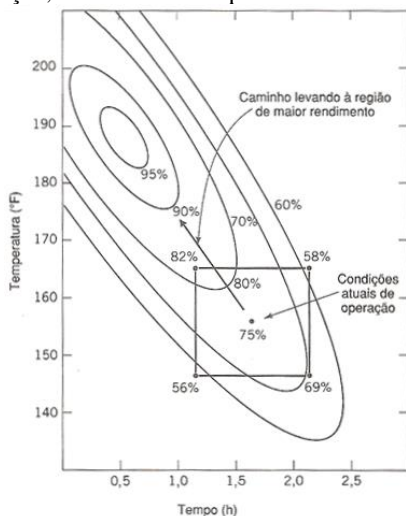
Fonte: (BUREŠ et al., 2012)

2.7. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E OTIMIZAÇÃO

Em sua maioria, os trabalhos publicados acerca do efeito do processamento nas propriedades do Somaloy® tratam de variáveis de processamento isoladas como o efeito da temperatura de tratamento térmico ou da pressão de compactação, mas raramente dos efeitos combinados dessas variáveis.

Como forma de ilustrar a importância de um estudo multivariável que leva em consideração a interação entre as variáveis de processamento envolvidas, Montgomery (MONTGOMERY; RUNGER; HUNBELE, 2004) exemplifica um determinado processo químico que exibe o comportamento de rendimento em termos dos fatores Tempo e Temperatura conforme apresentado na Figura 22. Nesse exemplo, o rendimento desse processo feito em 155 °F e 1,6 horas é de cerca de 75% nas condições atuais de operação. Como forma de otimizar o processo, o pesquisador poderia optar por analisar separadamente o efeito da temperatura e do tempo, mantendo uma variável como constante enquanto varia a outra. Dessa forma, variando-se o tempo enquanto mantém constante a temperatura e vice-versa, o pesquisador encontraria rendimentos menores do que do seu processo atual, levando-o a pensar que já está com seu processo otimizado. No entanto, realizando um estudo com a variação simultânea das variáveis Tempo e Temperatura em 2 níveis cada, a análise o leva a perceber que simultaneamente aumentando a temperatura e diminuindo o tempo de processamento se obtêm maiores valores de rendimento (MONTGOMERY; RUNGER; HUNBELE, 2004).

Figura 22 - Gráfico de curvas de nível do rendimento, como uma função do tempo e temperatura de reação, ilustrando um experimento de otimização.



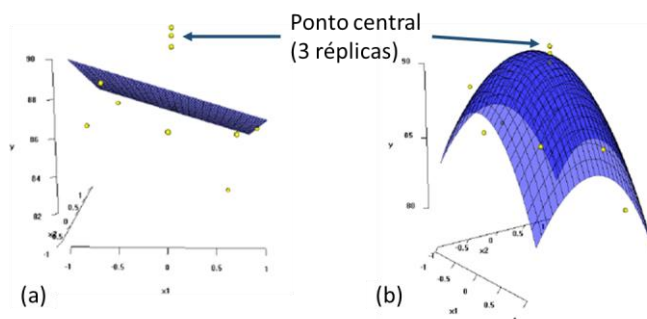
Fonte: (MONTGOMERY; RUNGER; HUNBELE, 2004)

Com o exemplo apresentado, percebe-se que um experimento multivariável pode trazer mais informações sobre o comportamento de um determinado sistema, podendo em alguns casos ser a única forma de atingir a configuração ideal de processamento devido ao efeito da interação entre fatores. Tendo isso em vista, a metodologia de superfície de resposta, introduzido em 1951 por Box e Wilson, tem mostrado grande eficiência para otimizar processos industriais com um número reduzido de amostras (ANDERSON; WHITCOMB, 2005; MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2011). Essa metodologia se baseia em um planejamento de experimentos do tipo composto central ou ainda do tipo Box-Behnken, em que as variáveis de processamento, dentro desse contexto chamado de fatores, são avaliadas em diferentes níveis. Com essas técnicas é possível ajustar um modelo aos dados medidos e assim oferecer potencial para predição de valores em condições de processamento diferentes daquelas usadas para a construção do modelo (ANDERSON; WHITCOMB, 2005; MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2011).

Os experimentos do tipo composto central são os mais populares dentre os planejamentos de experimentos de segunda ordem. Basicamente, estes experimentos seguem a partir de um experimento do tipo fatorial completo ou fracionado, o qual é capaz de produzir apenas

um modelo com características lineares (ESTATCAMP, 2015). Como exemplo de uma situação interessante para uso desse tipo de experimento pode se citar um processamento genérico com 2 fatores relevantes e que não se tem conhecimento sobre o comportamento da resposta medida em relação aos fatores. Nesse caso, um estudo onde cada um desses fatores é tomado com 2 níveis (fatorial completo) permite estipular um modelo linear para esse sistema. No entanto, a medição de um ponto central, preparado com condições de processo em um nível que é a média dos níveis usados para cada fator estudado, permite perceber se o modelo linear realmente satisfaz a condição ou se um modelo quadrático seria mais adequado, tal qual ilustrado na Figura 23a. Os termos quadráticos que geram a superfície mostrada na Figura 23b podem ser obtidos através de pontos adicionais ao experimento fatorial, formando então um experimento composto central (ESTATCAMP, 2015).

Figura 23 - Ajuste linear (a) e quadrático (b) de dados.

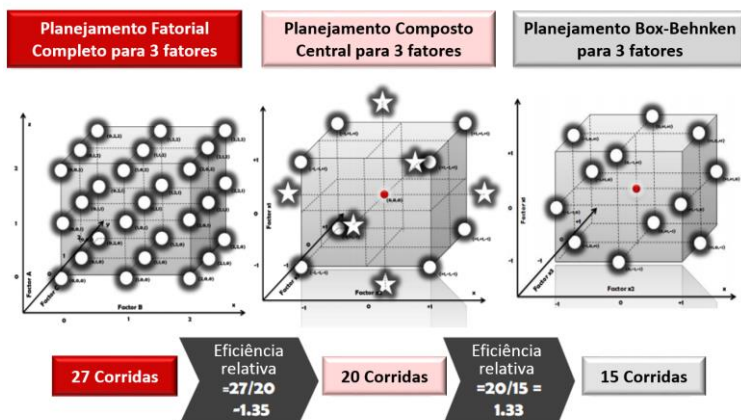


Fonte: Adaptado de (ESTATCAMP, 2015)

Já os experimentos do tipo Box-Behnken, também utilizados para modelar superfícies de resposta de forma parabólica, diferem dos planejamentos do tipo composto central de duas maneiras. Primeiramente, apenas 3 níveis para cada fator são empregados, enquanto o experimento composto central pode trabalhar com mais níveis. Além disso, os planejamentos Box-Behnken não têm pontos de vértices, sendo assim, algumas vezes, preferidos ao invés de planejamentos de composição central, quando há restrições físicas ou econômicas, pois eles impedem a utilização de pontos de vértices, ou seja, quando todos os níveis dos fatores estão em um extremo mínimo ou máximo (ESTATCAMP, 2015; FERREIRA et al., 2007). Além disso, o número de condições experimentais, ou corridas, necessárias para o experimento Box-Behnken com 3 ou 4 fatores é menor do que o necessário para o

experimento composto central e o fatorial completo como mostrado na Figura 24. Com um número maior de fatores, os experimentos compósitos centrais, utilizando os vértices de um planejamento fatorial fracionado, permitem obter quantidade equivalente de informação sobre o sistema estudado com um menor número de corridas em relação ao planejamento Box-Behnken.

Figura 24 - Representação esquemática de distribuição dos pontos dos planejamentos: fatorial completo, composto central e Box-Behnken para 3 fatores e eficiência relativa em termos de números de corridas.



Fonte: Traduzido de (CHAUDHARY, [s.d.]).

Como mencionado anteriormente, a metodologia de superfície de resposta permite gerar modelos que podem ser utilizados para a predição da resposta baseado em um conjunto de fatores diferentes daqueles que geraram o modelo. Dessa forma, é possível estimar um ponto ótimo de processo mesmo que esse ponto em particular não tenha sido executado. Portanto, a qualidade de predição de um determinado modelo é uma característica muito relevante quando o modelo será usado para esse fim. Essa característica pode ser mensurada na forma de um coeficiente denominado R^2_{pred} , o qual é calculado seguindo os seguintes passos (ANDERSON; WHITCOMB, 2005):

1. Remoção de uma observação individual (i) do conjunto original (n dados) e readaptação do modelo de regressão com os n-1 dados restantes.

2. Medição do erro na predição do ponto “i” com o novo modelo de regressão e elevar a diferença ao quadrado.
3. Repetir o processo para todas as n observações e computar a soma de todas as diferenças ao quadrado. Essa soma é usualmente chamada de PRESS (*Predicted Residual Sum of Squares*).
4. Por fim, tem-se a equação $R_{pred}^2 = 1 - (PRESS/SS_{CorTot})$. Em que SS_{CorTot} é a soma dos quadrados em torno da média.

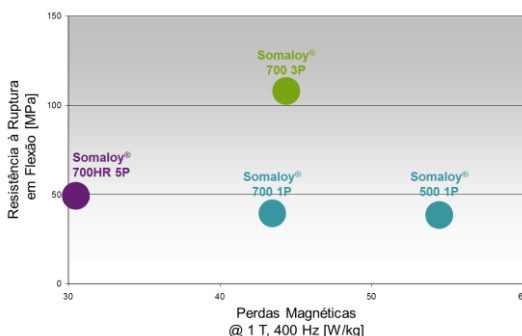
Dessa forma, quando realizando a regressão para gerar a superfície de resposta, pode-se adicionar ou remover termos da equação no sentido de maximizar R_{pred}^2 . Com isso, evita-se o sobreajuste do modelo sobre os pontos medidos e, consequentemente, um modelo mais confiável em termos de predição é produzido (ANDERSON; WHITCOMB, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. SOMALOY® 3P 700 E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado nesse trabalho, Somaloy® 3P 700, é uma classe da família Somaloy®, apresentada anteriormente no item 2.6, projetada para alcançar resistências mecânicas mais elevadas como exemplificado na Figura 25. Para tanto o tratamento indicado pela fabricante para esse material é a compactação a morno (aproximadamente 80 °C) seguida de tratamento térmico com atmosfera de nitrogênio contendo vapor d'água, dessa forma maximiza-se a formação de magnetita, óxido de ferro que confere a mais alta resistência mecânica para componentes fabricados a partir dessa classe.

Figura 25 - Propriedades típicas de diferentes classes da família Somaloy®.



Fonte: Traduzido de (WASHINGTON; POMPERMAIER; SJÖBERG, 2015).

Esse trabalho, no entanto, propõe a avaliação dessas propriedades quando realizado a compactação à frio seguida de tratamento térmico ao ar como forma alternativa para a produção de componentes baseados nesse material. Dessa forma, pode-se avaliar os resultados ótimos para essa situação que não envolve a aquisição de sistemas mais complexos para fabricação. Para efeito de comparação, os valores reivindicados pela fabricante para as propriedades de um componente tratado em atmosfera contendo vapor d'água estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades típicas de componentes à base de Somaloy® 3P 700 produzidos por compactação a morno seguido de tratamento térmico com vapor.

Resistividade elétrica	200 $\mu\Omega\cdot\text{m}$	
Resistência à Ruptura	125 MPa	
B @ 10000 A/m	1,61 T	
μ_{max}	750	
Perdas	100 Hz	10 W/kg
Magnéticas	400 Hz	46 W/kg
@ 1T*	1000 Hz	137 W/kg

* Propriedades magnéticas medidas em toróides de diâmetros interno e externo de 55 e 45 mm e altura de 5 mm.

Fonte: Traduzido de (HÖGANÄS, 2011).

As variáveis de produção investigadas nesse estudo foram selecionadas com base na facilidade de seu controle e no impacto esperado nas propriedades de interesse. Dessa forma, por meio da análise do estado da arte e das orientações obtidas com o fabricante do material, foram propostos estudar o efeito das variáveis de processamento: pressão de compactação, temperatura máxima de tratamento térmico e tempo de patamar nessa temperatura. Dessa forma, foram também definidos os níveis para cada uma dessas variáveis, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis de processamento e respectivos níveis que foram estudados nesse trabalho.

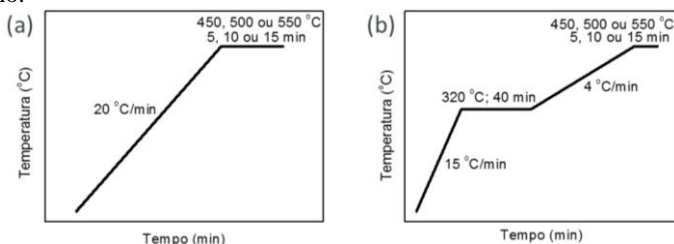
Variável de processamento	Níveis
Pressão de compactação	700, 800 e 900 MPa
Temperatura máxima	450, 500 e 550 °C
Tempo de patamar	5, 10 e 15 minutos

Fonte: Autor.

As variáveis de processo foram estudadas em dois tipos de tratamentos térmicos para os componentes que serão produzidos para caracterização das propriedades de interesse. Esses tratamentos serão doravante denominados Curto e Longo conforme expostos esquematicamente na Figura 26 e foram também definidos através de contato com a fabricante e análise do estado da arte.

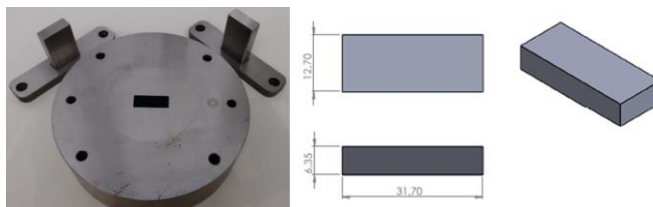
As amostras foram produzidas em dois formatos para posterior caracterização de resistência à ruptura em flexão, resistividade elétrica e propriedades magnéticas. As Figuras Figura 27 e Figura 28 ilustram a geometria das amostras produzidas, bem como apresentam o ferramental utilizado para a compactação das mesmas.

Figura 26 - Tratamento térmico Curto (a) e Longo (b) propostos para esse trabalho.



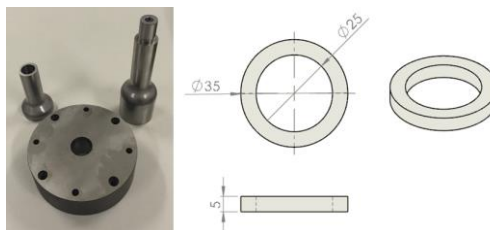
Fonte: Autor.

Figura 27 - Foto do ferramental e dimensões da amostra produzida no formato de barra.



Fonte: Autor.

Figura 28 - Foto do ferramental e dimensões da amostra produzida no formato de anel.



Fonte: Autor.

Na produção dessas amostras foram utilizadas uma prensa semi-automática para compactação uniaxial de duplo efeito e um forno de resistências para o tratamento térmico com as amostras expostas ao ar atmosférico. Durante o tratamento, a temperatura da amostra foi mensurada utilizando termopar de contato do tipo K, de forma que a temperatura máxima do estudo (Tabela 3) faz referência à temperatura das amostras.

3.1.1. Planejamento de Experimentos

Com base nos fatores e níveis escolhidos para ser estudados em relação a produção das amostras (Tabela 3) e no que foi encontrado na literatura e exposto na seção 2.6, um comportamento quadrático das respostas pode ser esperado. Por exemplo, para as perdas magnéticas uma vez que dois mecanismos concorrentes são ativados pelo fator temperatura:

- Baixas temperaturas não são tão efetivas para diminuição da tensão interna imposta pelo processo de compactação, consequentemente, não havendo diminuição significativa das perdas por histerese.
- Altas temperaturas são mais efetivas no sentido de diminuir as perdas por histerese. No entanto, também levam à uma degradação acelerada da camada isolante, causando aumento das perdas por correntes parasitas e perdas anômalas.

Com isso e havendo a possibilidade de haver significativa interação entre os fatores envolvidos, um experimento utilizando a metodologia de superfície de resposta se torna a forma mais interessante de promover a otimização do processo para esse tipo de material. Além disso, lembrando o que foi exposto na seção 2.7 desse trabalho, o experimento Box-Behnken permite diminuir o número de amostras do experimento quando analisando 3 fatores.

Dessa forma, dois planejamentos de experimentos Box-Behnken foram aqui explorados de maneira a cobrir o efeito das variáveis de processamento (pressão de compactação, máxima temperatura de tratamento térmico e tempo de permanência nessa temperatura) para os dois tipos de ciclo de tratamento térmico (Longo e Curto) propostos na Figura 26. As corridas foram realizadas seguindo a ordem apresentada na Tabela 4, sendo que a ordenação foi feita de forma aleatória para evitar tendências na observação dos resultados finais.

Após a produção das amostras, as mesmas foram caracterizadas em termos de perdas magnéticas, resistividade elétrica e resistência à ruptura em ensaio de flexão de 3 pontos. Com a caracterização dessas propriedades é possível realizar a criação de modelos matemáticos que correlacionam as propriedades mensuradas com os níveis dos fatores estudados. Na criação desses modelos foi considerado como fator

primordial a sua habilidade em prever novas observações através do coeficiente R^2_{pred} , cuja importância e forma de cálculo foram apresentadas na seção 2.7. Dessa forma, para cada situação de resposta analisada, foram incluídos e excluídos termos da equação da superfície de resposta de maneira a maximizar o valor de R^2_{pred} .

Tabela 4 - Corridas do planejamento de experimentos executado com respectivos níveis dos fatores.

Amostra	Pressão [MPa]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Ciclo
1	800	550	15	Longo
2	700	500	15	Curto
3	800	500	10	Curto
4	800	450	15	Longo
5	700	500	5	Longo
6	900	500	5	Curto
7	900	500	5	Longo
8	800	550	5	Longo
9	700	550	10	Curto
10	800	500	10	Curto
11	800	450	15	Curto
12	800	500	10	Longo
13	800	450	5	Longo
14	900	550	10	Longo
15	800	550	15	Curto
16	900	450	10	Longo
17	900	500	15	Longo
18	700	550	10	Longo
19	700	450	10	Longo
20	900	550	10	Curto
21	900	500	15	Curto
22	800	500	10	Curto
23	800	550	5	Curto
24	700	500	15	Longo
25	700	450	10	Curto
26	800	500	10	Longo
27	700	500	5	Curto
28	800	500	10	Longo
29	900	450	10	Curto
30	800	450	5	Curto

Fonte: Autor.

3.1.2. Programas Computacionais

Ao longo do trabalho foram utilizados alguns programas computacionais para auxiliar na geração do planejamento de experimentos, estabelecimento dos modelos analisados e apresentação dos resultados. Segue a listagem dos programas utilizados abaixo com a descrição de seu uso.

Minitab 17 – Utilizado para criação do planejamento de experimentos, geração dos modelos de regressão sobre os dados medidos, cálculo dos coeficientes de qualidade de modelo e identificação dos pontos mínimos e máximos das superfícies de resposta para todos os modelos gerados. Além disso, através da observação dos pontos ótimos da resposta, foi possível também identificar o conjunto de parâmetros de processo que permitiu alcançar a otimização em cada uma das situações analisadas.

Origin 9 – Utilizado para geração das representações gráficas dos resultados medidos e modelados, consolidados nas figuras apresentadas na seção de Resultados e Discussões desse trabalho.

3.2. MEDIÇÃO DE PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

As propriedades magnéticas das amostras foram avaliadas utilizando as amostras na forma de anel após o tratamento térmico. Para tanto, a preparação dessas amostras envolveu a realização de bobinamentos, de forma manual, de fios de cobre conforme ilustrado na Figura 29. Essa configuração de teste, conhecida como anel de Rowland, permite a obtenção de curvas de histerese quando aplica-se uma corrente elétrica no bobinamento primário, provocando um campo magnético H que passa a ser maximizado pelo material ferromagnético, gerando o campo induzido B . Pela lei de Faraday, a variação de campo magnético em um material condutor produz uma diferença de potencial no bobinamento secundário proporcional ao campo induzido B , servindo, portanto, como forma de leitura do campo induzido.

Figura 29 - Amostra na forma de anel de Rowland destacando os terminais dos bobinamentos primário e secundário.



Fonte: Autor.

O processo de medição foi realizado em uma bancada de testes de aços elétricos da Brockhaus Measurements, modelo MPG 100 D (Figura 30), possibilitando a medida das perdas magnéticas e obtenção das curvas de histerese. Com esse equipamento foram realizadas medidas nas induções máximas de 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 e 1,5 T e frequências de magnetização de 50, 60, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 Hz, respeitando a recomendação da norma NBR 5161, considerando válidas as medições com fator de forma na faixa de $1,110 \pm 1\%$. Devido ao grande tempo demandado na preparação dessas amostras apenas uma réplica de cada situação apresentada no planejamento de experimentos foi executada, considerando ainda que há 3 pontos centrais para estimativa do erro puro do experimento multivariável, totalizando 30 amostras.

Embora outras propriedades magnéticas tenham sido mensuradas, esse trabalho dará enfoque nas perdas magnéticas devido à grande relevância dessa característica quando na escolha do material/processo para fabricação de um componente destinado à uma aplicação em máquinas elétricas.

Figura 30 - Bancada de testes de aços elétricos MPG 100 D da Brockhaus.



Fonte: Autor.

3.3. MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

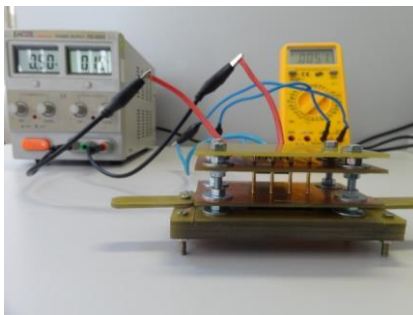
As amostras na forma de barra foram utilizadas para medição da resistividade elétrica através do método de quatro pontas utilizando aparato construído pelo autor desse trabalho (Figura 31). O funcionamento desse método, ilustrado na Figura 32, consiste na entrega de uma corrente contínua de valor constante pelas pontas externas à amostra, enquanto que as pontas internas realizam a leitura da diferença de potencial. Com a leitura da diferença de potencial (V) e a corrente passante (i), a resistividade elétrica (ρ) é obtida através da Equação 10.

$$\rho = \frac{V \cdot A}{i \cdot L} \quad (10)$$

Em que A é a seção transversal da amostra e L é a distância entre as agulhas elétricas que fazem a medição da diferença de potencial.

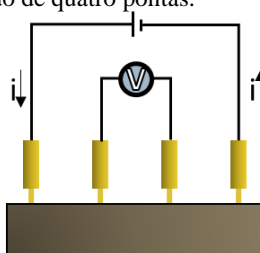
Para esse trabalho, a corrente elétrica foi mantida constante em 0,5 A e a distância entre as agulhas elétricas na construção do aparato foi de 8,6 mm. Um total de 90 amostras foram caracterizadas dessa forma, representando 3 réplicas do planejamento de experimentos apresentado na seção 3.1.1, contando com 3 medições por amostra.

Figura 31 - Aparato para medição de resistividade elétrica via método de quatro pontas.



Fonte: Autor.

Figura 32 - Representação esquemática do funcionamento do ensaio de medição de resistividade pelo método de quatro pontas.



Fonte: Autor.

3.4. MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

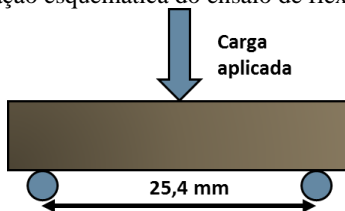
Após a verificação da resistividade elétrica, as amostras com formato de barra foram utilizadas para determinação da resistência mecânica na forma de um ensaio de flexão de 3 pontos. Para tanto foi utilizado uma máquina universal de ensaios mecânicos, modelo EMIC DL3000 (Figura 33), com uma célula de carga de 200 kgf. O ensaio foi realizado de acordo com a norma MPIF 41 e, portanto, a distância utilizada entre os roletes de apoio das amostras foi de 25,4 mm como apresentado na representação esquemática da Figura 34. A tensão de ruptura é calculada de acordo com a Equação 11.

Figura 33 - Máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL3000.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Representação esquemática do ensaio de flexão de 3 pontos.



Fonte: Autor.

$$\sigma_{3P} = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (11)$$

Em que F é a carga aplicada em N, L é a distância entre os roletes inferiores (nesse caso 25,4 mm), b e d são respectivamente a largura e a espessura do corpo de prova de seção retangular em mm. Foram caracterizadas 3 réplicas de cada condição de preparação de amostras apresentadas no planejamento de experimentos (seção 3.1.1).

Após a fratura do corpo de prova, a superfície de fratura foi analisada, buscando correlacionar a resistência à ruptura observada com a distribuição da rede óxida e variação da massa após o tratamento térmico. As imagens de superfície de fratura apresentadas nessa dissertação foram obtidas utilizando um microscópio digital Dino-Lite AM-311.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

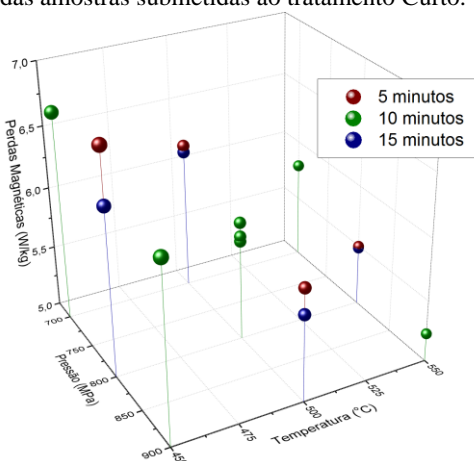
4.1. PERDAS MAGNÉTICAS

Nesse trabalho foram mensuradas as perdas magnéticas em diferentes condições de indução máxima e frequência de magnetização, sendo que cada uma dessas condições foi separadamente modelada. A seção 4.1.1 apresenta o processo de otimização exemplificado para uma dessas condições em que a indução máxima e a frequência de magnetização são respectivamente iguais a 1,0 T e 60 Hz. Seguindo então para a seção 4.1.2 em que os resultados otimizados de todas as condições de medição são apresentados e comparados entre si e com o que é reportado na literatura.

4.1.1. Perdas magnéticas – 1,0 T / 60 Hz

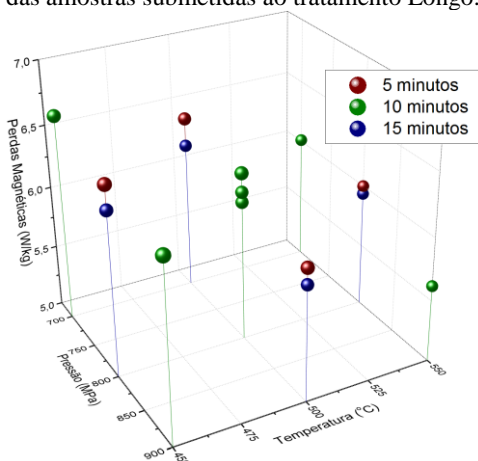
Após a produção das amostras segundo planejamento de experimentos apresentado na seção 3.1.1, as amostras na forma de anel previamente preparados foram avaliadas em relação às perdas na condição de indução máxima de 1,0 T e frequência de magnetização de 60 Hz. Os resultados dos pontos individuais obtidos são apresentados na Figura 35 para o tratamento Curto e na Figura 36 para o tratamento Longo.

Figura 35 - Distribuição dos pontos individuais relativo às perdas magnéticas (1,0 T – 60 Hz) das amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

Figura 36 - Distribuição dos pontos individuais relativo às perdas magnéticas (1,0 T – 60 Hz) das amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

Observando os resultados dos pontos individuais, pode-se perceber que:

- As perdas magnéticas são levemente menores para as amostras submetidas ao tratamento Curto em relação às amostras, com os mesmos parâmetros de produção, submetidas ao tratamento Longo.
- Para ambos os tratamentos, existe uma tendência de menores perdas, nessas condições de medição, quando as amostras são produzidas utilizando maiores pressões de compactação e tratadas em maiores temperaturas. Essa tendência pode ser melhor observada quando olhando para as amostras tratadas em um tempo de patamar de 10 minutos (pontos verdes nas figuras).
- Além disso, o tempo de permanência no patamar apresenta um pequeno efeito benéfico para a diminuição das perdas. Essa tendência pode ser observada pelo fato das amostras tratadas em um patamar de 15 minutos (pontos azuis) apresentarem perdas menores que as amostras compactadas com mesma pressão e tratadas na mesma temperatura com um tempo de patamar de 5 minutos (pontos vermelhos).

Com os dados coletados, dá-se início ao processo de obtenção da superfície de resposta através de modelos de regressão considerando os termos:

$$Y = a_0 + a_1P + a_2T + a_3t + a_4P.T + a_5P.t + a_6T.t + a_7P^2 + a_8T^2 + a_9t^2$$

Em que Y é resposta, nesse caso as perdas magnéticas para indução máxima de 1,0 T e frequência de 60 Hz, P é a pressão de compactação, T é a temperatura de patamar, t é o tempo de permanência nesse patamar e a_0 a a_9 são constantes calculadas no modelo de regressão.

Desse modo, o primeiro modelo a ser testado é aquele que inclui todos os termos apresentados acima, de modo a perceber o efeito das variáveis principais, interações de segunda ordem entre variáveis e efeitos de segunda ordem das variáveis principais. Embora tal modelo tenderá a se adaptar melhor aos dados medidos, obtendo-se um valor de R^2 mais próximo de 1, essa superfície pode estar sofrendo sobreajuste, apresentando pequenas inflexões que tornam menos preciso o processo de predição de novas observações. Esse sobreajuste pode, no entanto, ser percebido pelo coeficiente R^2_{adj} , o qual é uma versão modificada do R^2 convencional, que leva em consideração o número de termos do modelo e que diminui quando termos que levam ao sobreajuste são adicionados ao modelo. Além disso o próprio coeficiente R^2_{pred} , já mencionado nas seções 2.7 e 3.1.1, demonstra o potencial do modelo para predição de novas observações e também é um forte indicador do sobreajuste. Além do coeficiente R^2 e suas variantes, o erro padrão de regressão S também é um importante indicador para ser observado ao passo que representa a distância média entre os pontos medidos e a curva fitada. Além disso, 95% das observações devem cair dentro de $\pm 2*S$ da superfície, servindo assim como uma aproximação rápida do intervalo de predição. Maiores informações sobre esses coeficientes podem ser encontradas em (ANDERSON; WHITCOMB, 2005; MYERS; MONTGOMERY; ANDERSON-COOK, 2011). Sendo assim, a Tabela 5 demonstra os valores desses coeficientes e a equação matemática para o modelo de perdas (P_{total} - 1,0 T/ 60 Hz) gerado para as amostras submetidas ao tratamento Longo utilizando todos os termos anteriormente mencionados.

Tabela 5 - Equação e coeficientes do modelo de perdas (1,0 T/60 Hz) utilizando todos os possíveis termos para amostras do tratamento Longo.

Equação matemática de perdas magnéticas [W/kg]			
$P_{\text{total}} = 5,11 + 0,0094 P - 0,0001 T - 0,090 t - 0,000004 P^2 - 0,000000 T^2 - 0,00127 t^2 - 0,000009 P*T + 0,000046 P*t + 0,000127 T*t$			
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,115	93,58%	82,03%	32,26%

Fonte: Autor.

Uma forma eficaz para detectar quais dos termos não contribuem efetivamente para o ajuste da superfície sobre os dados mensurados é a observação do P-valor para cada termo quando da criação do modelo. P-valores mais próximos de 0 demonstram termos bastante relevantes, enquanto que termos com P-valores maiores podem ser a fonte do sobreajuste. Dessa forma, a geração sucessiva de modelos de regressão, através da remoção consecutiva dos termos com altos P-valores, e observação dos coeficientes R^2_{adj} e R^2_{pred} permitem a obtenção de um modelo ideal quando escolhido o conjunto de termos que maximizam os valores desses coeficientes. Por exemplo, a Tabela 6 sumariza, para as amostras submetidas ao tratamento Longo, as informações relativas ao efeito de cada termo e seus respectivos P-valores na construção da superfície de resposta para as perdas magnéticas (1,0 T / 60 Hz).

Tabela 6 - Efeitos e P-valores dos termos usados na regressão para modelamento das perdas (1,0T/60Hz) para amostras submetidas ao tratamento Longo.

Termo	Efeito	P-Valor	Ordem por P-Valor
Constante	6,2253	*	*
Pressão (P)	-0,3071	0,013	*
Temperatura (T)	-0,5934	0,001	*
Tempo (t)	-0,1495	0,125	*
Pressão ² (P ²)	-0,0892	0,489	6
Temperatura ² (T ²)	-0,0013	0,992	1
Tempo ² (t ²)	-0,0634	0,619	3
Pressão*Temperatura (P*T)	-0,0854	0,491	5
Pressão*Tempo (P*t)	0,0458	0,707	2
Temperatura*Tempo (T*t)	0,0635	0,604	4

Fonte: Autor.

Os termos ordenados de forma decrescente com base em seus P-Valores (Tabela 6) foram sucessivamente retirados, seguido da realização de uma nova regressão com os termos restantes, sendo que os coeficientes desses subsequentes modelos estão apresentados na Tabela 7. Portanto,

para as amostras submetidas ao tratamento Longo o modelamento de perdas (1,0 T/60 Hz) ideal é obtido quando restam apenas os efeitos principais (Tabela 8), isto é, quando se obtém a maximização dos valores de R^2_{adj} e R^2_{pred} . Além disso, percebe-se na Tabela 7 que o erro padrão de regressão S também diminui à medida que são retirados termos do modelo para as perdas (1,0 T/ 60 Hz) de amostras submetidas ao tratamento Longo, o que mostra a obtenção de um modelo mais preciso.

A representação gráfica do modelo ótimo gerado está apresentada na Figura 37 para tempos de patamar de 5, 10 e 15 minutos. Os pontos mensurados apresentados na Figura 36 foram adicionados ao gráfico para visualização da boa correlação entre as superfícies e os pontos medidos.

Tabela 7 - Coeficientes dos modelos de regressão para perda magnéticas (1,0 T/ 60 Hz) após a retirada consecutiva dos termos com altos P-Valores para amostras submetidas ao tratamento Longo.

Modelo	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
Todos os termos	0,115	93,58%	82,03%	32,26%
Todos - T ²	0,105	93,58%	85,03%	54,76%
Todos - T ² - P*t	0,099	93,38%	86,76%	54,50%
Todos - T ² - P*t - t ²	0,095	93,02%	87,78%	65,66%
Todos - T ² - P*t - t ² - T*t	0,092	92,62%	88,53%	74,91%
Todos - T ² - P*t - t ² - T*t - P*T	0,091	91,92%	88,68%	82,10%
Todos - T ² - P*t - t ² - T*t - P*T - P ²	0,090	91,27%	88,88%	84,31%

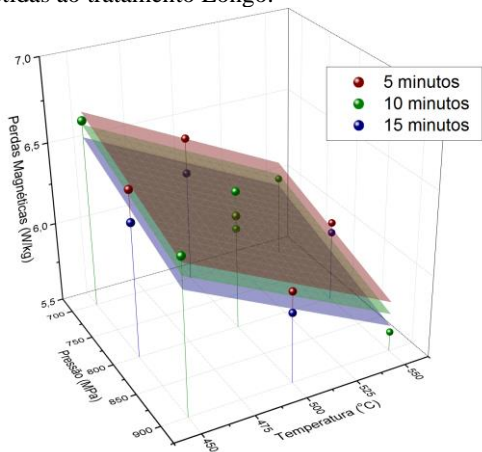
Fonte: Autor.

Tabela 8 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de perdas (1,0 T/60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Longo.

Equação matemática de perdas magnéticas [W/kg]			
$P_{total} = 10,529 - 0,001536 \text{ Pressão} - 0,005934 \text{ Temperatura} - 0,01495 \text{ Tempo}$			
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,090	91,27%	88,88%	84,31%

Fonte: Autor.

Figura 37 - Representação gráfica do modelo ótimo de perdas (1,0 T/ 60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

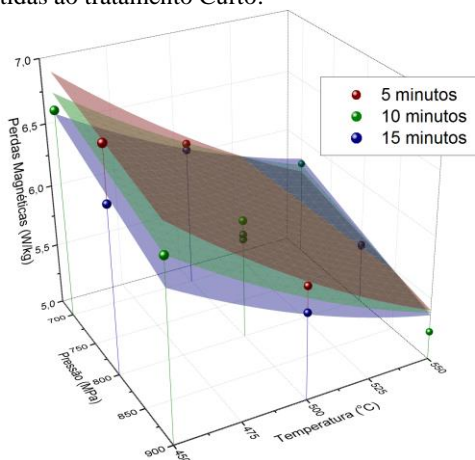
De maneira semelhante ao que foi realizado para o tratamento Longo, o modelo ótimo para as perdas magnéticas (1,0 T/ 60 Hz) das amostras submetidas ao tratamento Curto foi obtido e seus coeficientes estão apresentados na Tabela 9. No entanto, enquanto o modelo para o tratamento Longo foi considerado ótimo quando levou em consideração apenas os efeitos principais, o modelo ótimo para o tratamento Curto tem importante participação do efeito quadrático da temperatura e das interações: pressão de compactação-tempo de patamar e temperatura-tempo de patamar. A representação gráfica do modelo gerado para o tratamento Curto está apresentada na Figura 38 para os tempos de patamar de 5, 10 e 15 minutos, juntamente com os pontos individuais para visualização da correlação entre os dados medidos e modelados.

Tabela 9 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de perdas (1,0 T/60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Curto.

Equação matemática de perdas magnéticas [W/kg]			
$P_{total} = 23,73 - 0,001177 P - 0,0517 T - 0,169 t + 0,000037 T^2 - 0,000077 P*t + 0,000426 T*t$			
S	R²	R²(adj)	R²(pred)
0,088	97,78%	96,12%	92,64%

Fonte: Autor.

Figura 38 - Representação gráfica do modelo ótimo de perdas (1,0 T/ 60 Hz) para amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

Para ambos os tratamentos, a tendência dos modelos é a diminuição das perdas quando o processamento inclui maiores pressões de compactação e maiores temperaturas de tratamento térmico. O efeito do tempo de patamar no tratamento é bastante reduzido em relação às outras duas variáveis, mas esse fator também promove a diminuição das perdas para tempos de patamar mais longos. Essas tendências já haviam sido observadas analisando os pontos individuais e foram novamente confirmadas através dos modelos. No entanto, com os modelos obtidos é possível também estimar o valor de perdas magnéticas para qualquer combinação de parâmetros dentro da faixa estudada.

Por se tratar de um estudo primariamente de otimização, o ponto que mais se tem interesse em conhecer é justamente qual o valor das perdas mínimas e qual o conjunto de níveis das variáveis de processamento que levam à essa condição. Dessa forma, a Tabela 10 apresenta os intervalos de predição (IP) para as perdas, com 95% de nível de confiança, e o conjunto de parâmetros que levam às menores perdas magnéticas para a condição de medição de indução máxima de 1,0 T e frequência de magnetização de 60 Hz.

Tabela 10 - Intervalos de predição de perdas magnéticas ótimas (1,0 T/ 60 Hz) e conjunto de parâmetros que levam à essa condição.

Tratamento	Pressão de compactação [MPa]	Temperatura máxima [°C]	Tempo de patamar [minutos]	IP (95% de confiança) para perdas magnéticas (1,0 T/ 60 Hz) [W/kg]
Curto	900	550	15	5,00 - 5,57
Longo	900	550	15	5,42 - 5,90

Fonte: Autor.

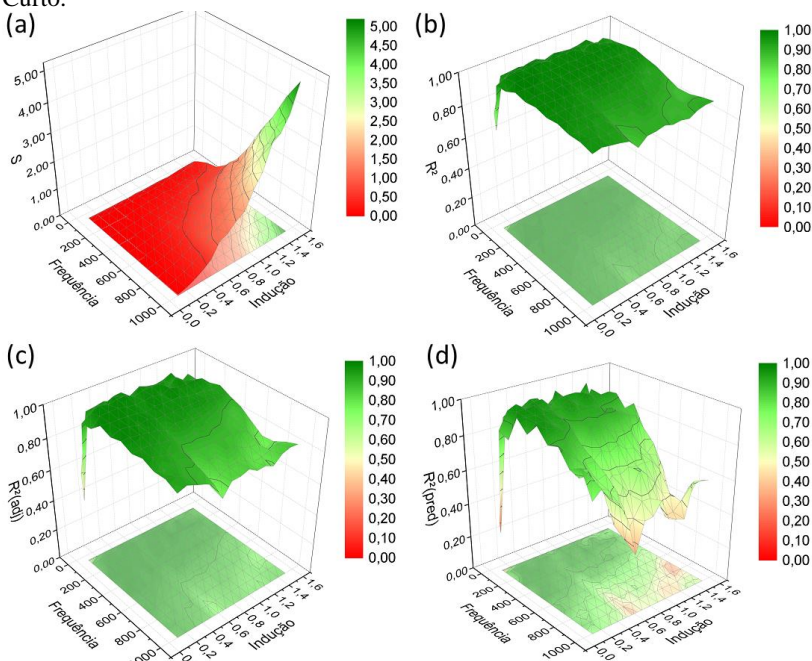
Assim como já havia sido observado para os pontos individuais, percebe-se que para a condição prevista como ótima dentro da faixa de parâmetros estudada, o tratamento Curto permite produzir componentes com níveis de perdas magnéticas levemente menores do que os componentes submetidos ao tratamento Longo. Além disso, os dois tipos de tratamentos são muito próximos em termos de intervalo de predição, sendo que o modelo para o tratamento Longo possui um intervalo brevemente mais estreito como também pode ser observado comparando o erro padrão de regressão dos dois modelos.

4.1.2. Perdas magnéticas – Resultados otimizados

Os modelos apresentados nessa seção foram otimizados de forma análoga ao que foi apresentado na seção anterior para as perdas magnéticas na condição de medição com indução máxima de 1,0 T e frequência de 60 Hz. Dessa forma, todas as combinações de medição em termos de indução máxima e frequência de magnetização propostas para esse trabalho ($B_{\text{máx}}$ de 0,1 a 1,5 T e f de 50 a 1000 Hz) foram também modeladas e as suas equações e respectivos coeficientes estão listados em Apêndice A, enquanto que os pontos ótimos de processamento e as perdas previstas na condição otimizada estão apresentadas no Apêndice B.

Os coeficientes de regressão dos modelos ótimos estão apresentados na forma gráfica para cada combinação de indução máxima e frequência estudada na Figura 39 para as amostras submetidas ao tratamento Curto. Para a grande maioria dos casos modelados os valores de R^2 são bastante altos – 90% dos casos possuem R^2 acima de 0,9, com a exceção notável da condição com indução máxima de 0,1 T e frequência de 50 Hz. O baixo valor de R^2 nessa condição também refletiu em baixos valores de R^2_{adj} e R^2_{pred} e demonstra a dificuldade em se perceber o efeito do processamento na resposta de perdas nessa condição de medição, sendo que as amostras apresentam respostas similares nesse teste embora processadas de maneiras distintas.

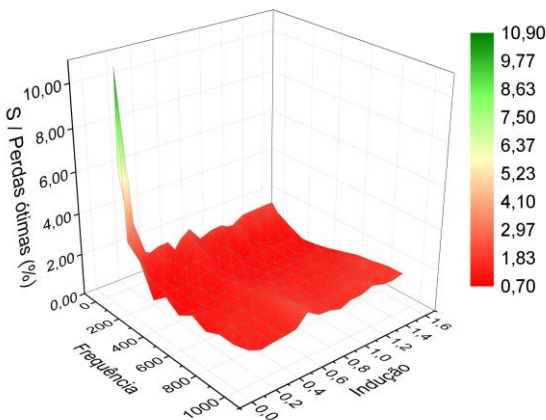
Figura 39 - Coeficientes de regressão (a) S , (b) R^2 , (c) R^2_{adj} e (d) R^2_{pred} dos modelos ótimos de perdas magnéticas para amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

Outro ponto importante em relação aos modelos gerados para perdas das amostras submetidas ao tratamento Curto é que embora os dados modelados possuam boa correlação com os dados medidos, demonstrado pelos baixos valores de S e os altos valores de R^2 e R^2_{adj} , o potencial de predição, com base nos valores de R^2_{pred} , diminui para os modelos com maiores frequências de magnetização. Observa-se ainda que à medida que as condições desejadas de operação vão para maiores valores de indução máxima e frequência, maior se torna o erro padrão de regressão (S) do modelo. O erro padrão, no entanto, é proporcional as perdas, representando menos que 2% em relação ao valor das perdas otimizadas, como apresentado na Figura 40, exceto para a condição de 0,1 T/ 50 Hz, cujo modelo possui baixos valores de R^2 , R^2_{adj} e R^2_{pred} , como mencionado anteriormente.

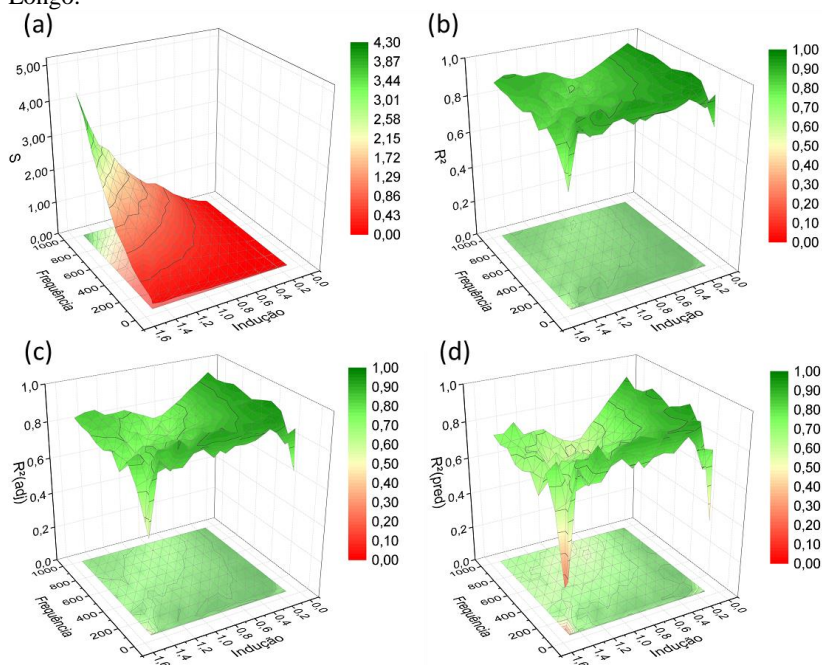
Figura 40 - Razão entre erro padrão de regressão e perdas ótimas para todas as condições de medição para as amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

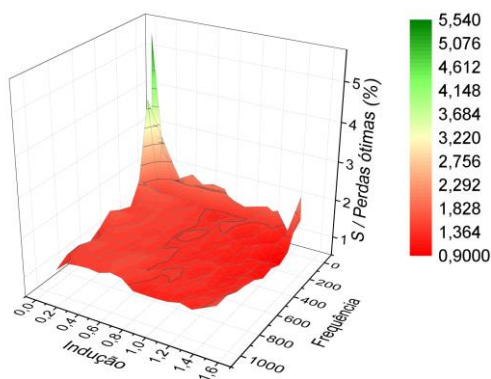
Os coeficientes referentes aos modelos ótimos das amostras submetidas ao tratamento Longo estão graficamente representados na Figura 41. De forma semelhante ao ocorrido para os modelos do tratamento Curto, os modelos para esse tratamento também apresentam baixos valores de S e altos valores de R^2 , R^2_{adj} e R^2_{pred} para a maior parte dos casos estudados. No entanto, para esse tipo de tratamento houve também dificuldade em se perceber os efeitos do processamento para a condição de medição com indução máxima de 0,1 e 1,5 T nas frequências de 50 e 60 Hz, como se percebe nesse caso pelos baixos valores de R^2 , e consequentes baixos R^2_{adj} e R^2_{pred} nesses casos específicos. Além disso, como já observado para os modelos do tratamento Curto, o erro padrão de regressão S é mais alto para as combinações de alta indução máxima e alta frequência de magnetização. Novamente o erro é proporcional as perdas, e a razão entre o erro e as perdas ótimas obtidas está abaixo de 2%, como apresentado na Figura 42, exceto pelos pontos com baixos R^2 , R^2_{adj} e R^2_{pred} .

Figura 41 - Coeficientes de regressão (a) S , (b) R^2 , (c) R^2_{adj} e (d) R^2_{pred} dos modelos ótimos de perdas magnéticas para amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

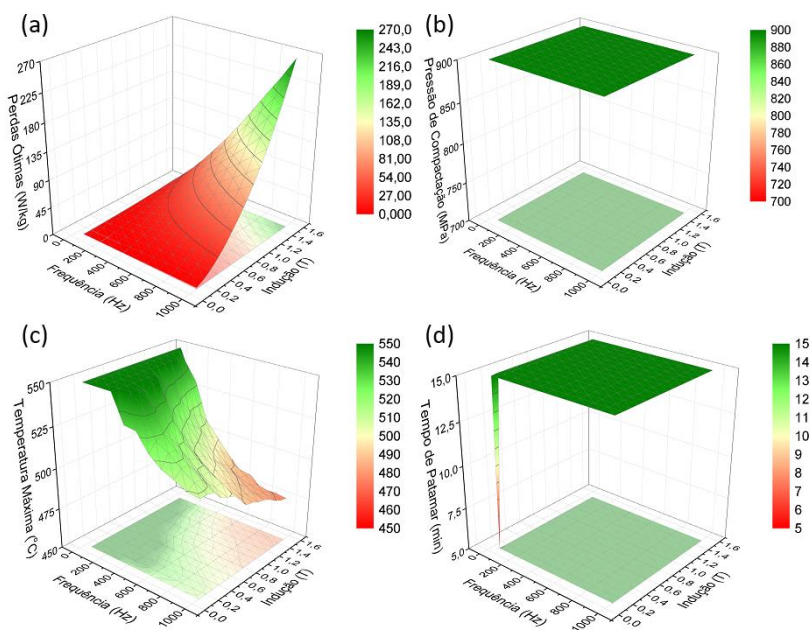
Figura 42- Razão entre erro padrão de regressão e perdas ótimas para todas as condições de medição para as amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

Os modelos ótimos gerados para ambos tratamentos podem ser utilizados para a estimativa de perdas magnéticas com base em novas condições de fabricação, incluindo para realizar a determinação dos pontos ótimos de processamento para obtenção das menores perdas, ou perdas ótimas, em cada uma das combinações estudadas. As perdas ótimas e seus respectivos pontos de processamento estão ilustrados na Figura 43 para as amostras submetidas ao tratamento Curto.

Figura 43 - (a) Perdas estimadas na condição otimizada para amostras submetidas ao tratamento Curto e (b) Pressão de Compactação, (c) Temperatura Máxima e (d) Tempo de Patamar correspondente ao processamento otimizado.



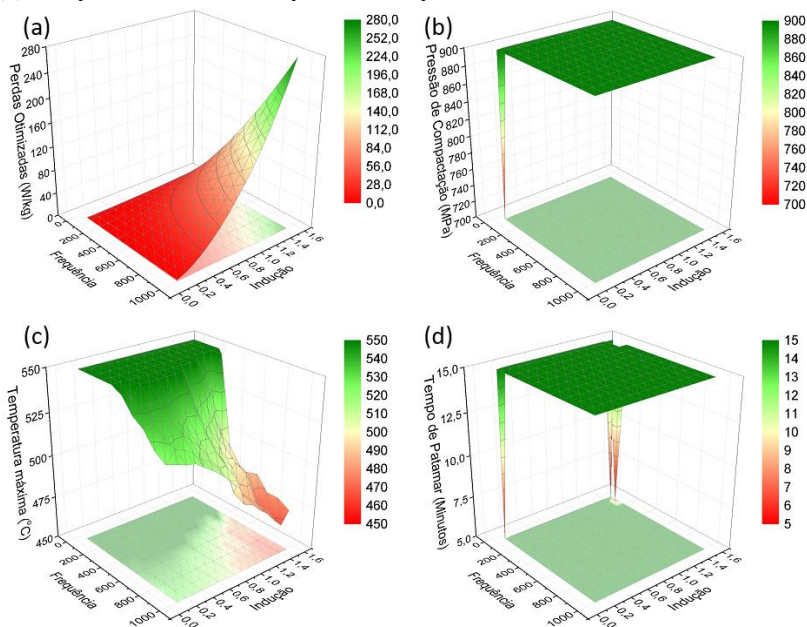
Fonte: Autor.

Percebe-se então que as perdas magnéticas ótimas para as amostras submetidas ao tratamento Curto são mais fortemente afetadas pela temperatura máxima de tratamento térmico, uma vez que a pressão de compactação e o tempo de patamar que levam às menores perdas são mantidas constantes respectivamente em 900 MPa e 15 minutos para praticamente todas as combinações estudadas. Em relação ao tempo de patamar a única exceção demonstrada no gráfico é justamente a combinação 0,1 T / 50 Hz, cujo modelo apresenta fraca correlação entre

dados medidos e modelados como demonstrado pelos coeficientes desse modelo específico anteriormente mencionado. Também se observa nesses resultados que a etapa de compactação capaz de produzir componentes mais densos – através de maior pressão de compactação – permite reduzir as perdas magnéticas, indo ao encontro do que é reportado na literatura (GILBERT et al., 2004). Além disso, percebe-se que a temperatura é o principal fator a ser modificado no processamento para diferentes condições de aplicação. Sendo assim, aplicações que consideram maiores níveis de indução e frequência de magnetização deverão utilizar menores temperaturas máximas no tratamento térmico (Figura 43c). De maneira semelhante, Ślusarek *et al.* e Gilbert *et al.* (GILBERT et al., 2004; ŚLUSAREK et al., 2015) observaram que embora maiores temperaturas aliviem as perdas por histerese (dominante em baixas frequências), elas podem também causar a diminuição da resistividade elétrica através da degradação do isolante elétrico, causando o aumento das perdas por corrente parasita e perdas anômalas, as quais são proporcionais ao quadrado da frequência de magnetização (KOLLÁR et al., 2013). Uma vez que as perdas anômalas e por correntes parasitas também são proporcionais ao quadrado da indução máxima, ainda que se mantenha a frequência como constante, um componente para aplicação com nível de indução mais alto deve ser tratado termicamente em menor temperatura que um componente para aplicação em menor nível de indução pela mesma razão apontada pelos outros autores em relação à frequência.

As tendências apontadas para os modelos gerados considerando o tratamento Curto, também podem ser observadas para os modelos das amostras submetidas ao tratamento Longo na Figura 44. A pressão de compactação e o tempo de patamar que levam às condições de menores perdas são praticamente constantes para todas as situações modeladas, exceto para os pontos em que a correlação entre os dados medidos e modelados é baixa, conforme mencionado anteriormente a respeito dos coeficientes de regressão desses modelos. Além disso, a temperatura máxima de tratamento térmico é a condição de processamento que realmente deve ser variada de acordo com a combinação de indução máxima e frequência de uma determinada aplicação. Embora a tendência na mudança de temperatura ótima em vista das perdas magnéticas para os dois tipos de tratamentos térmicos seja a mesma, as temperaturas máximas consideradas ótimas para amostras submetidas ao tratamento Longo são, em boa parte dos casos estudados, ligeiramente mais altas que àquelas definidas para amostras submetidas ao tratamento Curto.

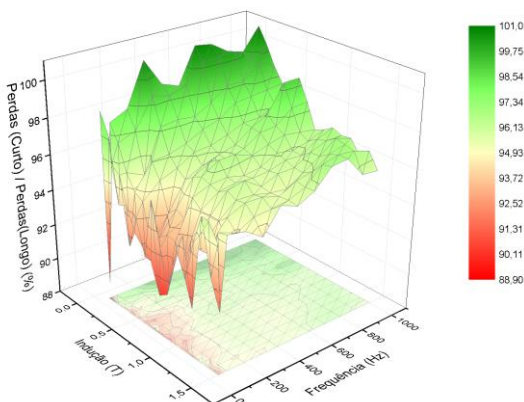
Figura 44 - (a) Perdas estimadas na condição otimizada para amostras submetidas ao tratamento Longo e (b) Pressão de Compactação, (c) Temperatura Máxima e (d) Tempo de Patamar correspondente ao processamento otimizado.



Fonte: Autor.

Comparando-se as perdas ótimas encontradas para os dois tipos de tratamentos, percebe-se uma pequena diferença entre elas e que pode ser melhor visualizada através da razão entre as perdas previstas para o tratamento Curto e as perdas previstas para o tratamento Longo na mesma condição de medição, conforme representado na Figura 45. Analisando essa razão entre as perdas, percebe-se que as médias das perdas previstas para o tratamento Curto são levemente menores que as médias das perdas previstas para o tratamento Longo para praticamente todas as combinações de medição estudadas. Essa observação é ainda mais evidente para baixas frequências e também para altas induções. No entanto, é importante ressaltar que essa comparação está representada em termos das médias previstas, podendo haver ainda considerável interpolação dos intervalos de predição em alguns casos, especialmente quando a razão entre as perdas ótimas dos dois tratamento é próxima de 100%.

Figura 45 - Razão entre perdas ótimas dos dois tipos de tratamento térmico.

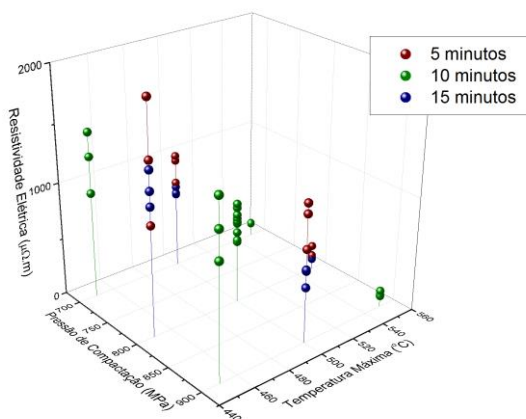


Fonte: Autor.

4.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

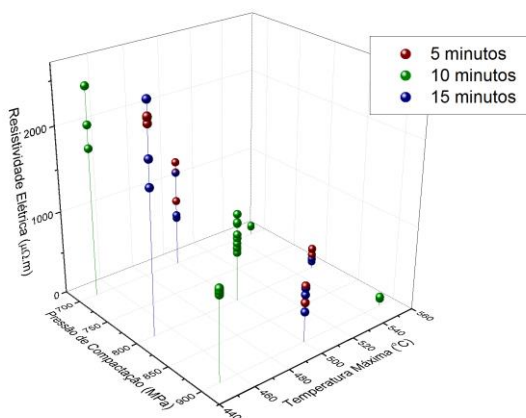
As amostras na forma de barra, após o tratamento térmico, foram avaliadas em função de sua resistividade elétrica antes do ensaio para caracterização de resistência mecânica. É importante lembrar que para essa caracterização, foram efetuadas 3 réplicas para cada condição de processamento definida no planejamento de experimentos, e em cada uma dessas amostras foram realizadas 3 medições de resistividade. Para facilitar a visualização dos pontos individuais, apenas as médias de cada uma das 3 medições estão apresentadas para cada réplica na Figura 46 e na Figura 47, representando respectivamente as amostras submetidas ao tratamento Curto e ao tratamento Longo.

Figura 46 - Distribuição dos pontos individuais relativo à resistividade elétrica das amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

Figura 47 - Distribuição dos pontos individuais relativo à resistividade elétrica das amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

Os resultados para os dois tipos de tratamento térmico demonstram uma influência muito forte da temperatura na diminuição do valor médio da resistividade e também na dispersão dos resultados dessas medições. Percebe-se ainda que algumas amostras submetidas ao tratamento Longo na temperatura de 450 °C possuem valores mais altos que as amostras

tratadas nas mesmas condições, porém submetidas ao tratamento Curto. Essa diferença observada poderia eventualmente estar associada à formação de óxidos de ferro (composto de baixa condutividade) em mais baixa temperatura em maior quantidade nas amostras do tratamento Longo, uma vez que nesse ciclo as amostras são mantidas em um patamar de 320 °C por 40 minutos. No entanto, embora as amostras submetidas ao tratamento Longo realmente apresentaram de maneira geral maior ganho de massa, associada à oxidação, em relação às amostras submetidas ao tratamento Curto, não é possível afirmar com as evidências encontradas que seja realmente a formação de óxidos a responsável pela diferença observada. Uma outra hipótese é que o aparato utilizado tenha limitações para medições em corpos de prova de alta resistividade elétrica, uma vez que a dispersão de resultados observada para as amostras tratadas na temperatura de 450 °C, em ambos tratamentos, foi bastante alta. Por fim, observa-se ainda, exclusivamente para as amostras submetidas ao tratamento Longo, que altas pressões de compactação apresentam um efeito deletério à resistividade elétrica, principalmente em temperaturas mais baixas, sendo ainda de forma geral um efeito muito reduzido em relação ao efeito da temperatura máxima de tratamento térmico.

Afim de quantificar os efeitos das variáveis e suas interações na resposta resistividade elétrica foi realizado um processo de otimização da superfície de resposta análogo ao apresentado na seção 4.1.1 para as perdas magnéticas. Para as amostras submetidas ao tratamento Curto, a equação da superfície de resposta ótima para resistividade elétrica (ρ_R) e seus coeficientes estão apresentados na Tabela 11. Analisando os coeficientes de regressão se percebe que o erro padrão de regressão é consideravelmente alto, fazendo com que a predição apresente a tendência correta, como demonstrado pelos altos R^2 e suas variantes, mas com um intervalo de predição bastante largo devido ao alto valor de S.

Tabela 11 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Curto.

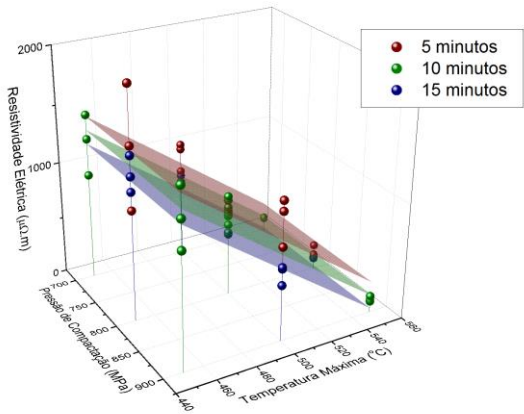
Equação matemática de resistividade elétrica [$\mu\Omega \cdot m$]			
$\rho_R = 6833 + 0,088 * P - 11,848 * T - 23,89 * t$			
S	R^2	$R^2(\text{adj})$	$R^2(\text{pred})$
181,097	86,70%	85,73%	83,61%

Fonte: Autor.

A tendência apresentada para o modelo de resistividade elétrica de amostras submetidas ao tratamento Curto, graficamente representada na Figura 48 juntamente com os pontos medidos, novamente demonstram

uma forte queda em função da temperatura, a qual está associada à degradação da camada isolante de fosfato de ferro como relatado por outros autores (GILBERT et al., 2004; NOLAN, 2009; OIKONOMOU et al., 2014; ŚLUSAREK et al., 2015).

Figura 48 - Representação gráfica do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

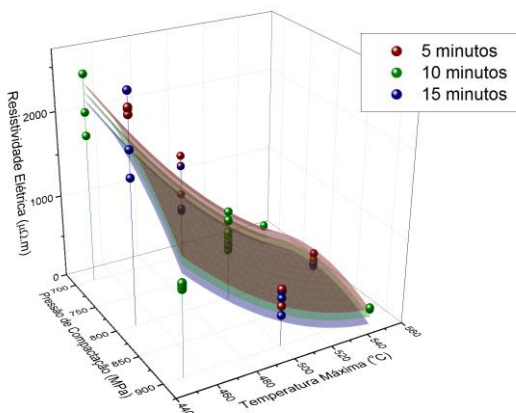
Já para as amostras submetidas ao tratamento Longo, o modelo ótimo e seus coeficientes estão apresentados na Tabela 12 e as observações realizadas para o tratamento Curto também são observadas nesse caso: boa correlação entre os dados modelados e medidos, porém um alto valor do erro de regressão, o que leva a um intervalo de predição demasiadamente largo. No entanto, nesse modelo percebe-se também uma participação maior do efeito da pressão de compactação e da interação pressão-temperatura na diminuição da resistividade elétrica em relação ao modelo gerado para as amostras submetidas ao tratamento Curto, como pode ser percebido na representação da Figura 49.

Tabela 12 - Equação e coeficientes do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Longo.

Equação matemática de resistividade elétrica [μΩ . m]			
$\rho_R = 42727 + 9,6 P - 160,3 T - 18,5 t - 0,02386 P^2 + 0,1004 T^2 + 0,0524 P \cdot T$			
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
251,182	90,59%	89,10%	86,48%

Fonte: Autor.

Figura 49 - Representação gráfica do modelo ótimo de resistividade elétrica para amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

Pressões de compactação muito altas podem causar a quebra da camada de fosfato durante a etapa de compactação, levando à diminuição da resistividade elétrica antes mesmo do tratamento térmico como exposto por Gilbert *et al.* (GILBERT *et al.*, 2004). No entanto, percebe-se com os resultados aqui apresentados que esse efeito é bastante menor que o efeito da temperatura, especialmente quando as amostras são tratadas em altas temperaturas.

Além disso, os resultados observados para a resistividade elétrica em função da temperatura, para os dois tipos de tratamento, suportam a explicação apresentada para a mudança da temperatura máxima considerada ótima em relação às perdas magnéticas. A medida que são aumentadas a frequência de magnetização e a indução máxima da condição de medição, maiores se tornam as perdas anômalas e por corrente parasita, as quais são inversamente proporcionais à resistividade elétrica. Dessa forma, para aplicações em altas frequências/induições, temperaturas máximas reduzidas, como apresentado na seção 4.1.2, se tornam mais indicadas pois mantêm a resistividade elétrica em um maior nível ao passo que a camada de fosfato é preservada.

A comprovação dessa argumentação poderia ser realizada através da divisão de perdas conforme realizado por Kóllar (KOLLÁR *et al.*, 2013), a qual exige a medida da resistividade dos anéis. No entanto, não existe garantia de que os valores de resistividade das amostras na forma de barra e na forma de anel sejam realmente similares. Além disso, ainda

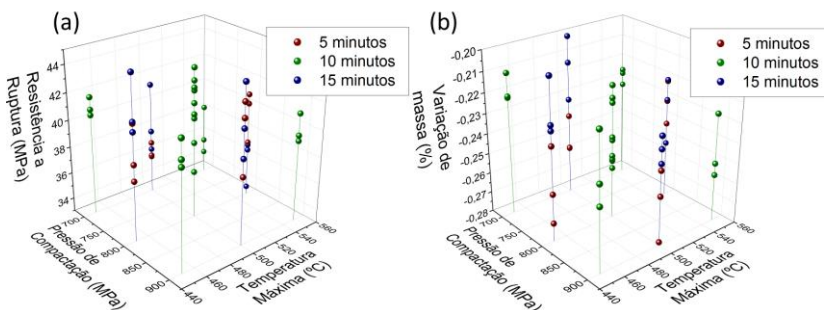
que se mostrem similares, a grande dispersão das medidas, especialmente para as amostras tratadas em menor temperatura, utilizando o aparato construído para a medição de resistividade nas barras tornaria a divisão de perdas imprecisa. Dessa forma, não foi considerado prudente a realização da separação das perdas com os dados já coletados e um novo aparato para medição da resistividade dos anéis deve ser construído para esse propósito.

4.3. RESISTÊNCIA A RUPTURA EM FLEXÃO DE 3 PONTOS

Após a avaliação da resistividade elétrica das amostras na forma de barra, as amostras foram submetidas ao ensaio de flexão de 3 pontos. Nesse ensaio todas as amostras apresentaram uma fratura frágil, tendo assim como forma de avaliação de sua resistência mecânica a própria resistência à ruptura em flexão. Assim como na caracterização de resistividade elétrica, a determinação da resistência a ruptura foi realizada com 3 amostras em cada condição de processamento do planejamento de experimentos, respeitando as condições sugeridas pela norma MPIF 41.

A Figura 50a apresenta os pontos individuais relativos à resistência a ruptura das amostras que foram submetidas ao tratamento Curto, enquanto que a Figura 50b apresenta a variação de massa após o tratamento térmico dessas mesmas amostras.

Figura 50 - Distribuição dos pontos individuais relativo a (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa das amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

Percebe-se que a variação de massa de todas as amostras se mostram negativas, isso porque o material inicial contém cerca de 0,3% de lubrificante que é eliminado durante o tratamento, sendo que o restante da massa adquirida durante o tratamento é devido à oxidação da amostra.

No entanto, na resposta das amostras submetidas a esse tratamento não se percebe claramente um padrão nem da variação de massa, nem da resistência a ruptura das amostras, mas sim que todas as condições de processamento realizadas apresentam respostas similares com resistência a ruptura média de 39,78 MPa, com desvio padrão de 2,77 MPa. Como os efeitos do processamento para esse tipo de ciclo são da mesma ordem da dispersão dos resultados, os modelos gerados de resistência a ruptura e variação de massa são poucos representativos (baixos R^2 e R^2_{adj}) e com reduzida capacidade de prever novas observações (baixo R^2_{pred}). As equações e coeficientes dos modelos produzidos para amostras submetidas ao tratamento Curto estão apresentadas na Tabela 13. A representação desses modelos, apresentados na Figura 51 se mostram bastante confusos e pouco representativos dos dados medidos, como esperado a partir dos coeficientes desses modelos.

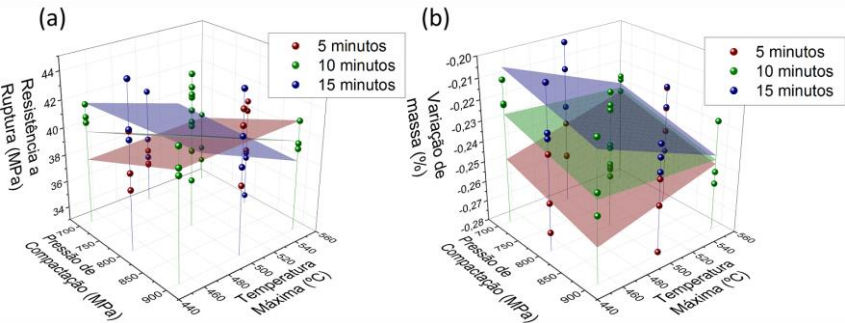
Tabela 13 - Equações e coeficientes dos modelos ótimos de resistência a ruptura e variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Curto.

Equação matemática de resistência a ruptura [MPa]			
$\sigma_{3P} = 8,1 + 0,01533 P + 0,0376 T + 3,56 t - 0,00700 T*t$			
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
2,113	47,04%	41,74%	34,56%

Equação matemática de variação de massa (%)			
$\% \text{ massa} = (-3,778 - 0,0724 P + 0,353 T + 22,09 t - 0,0394 T*t)/1000$			
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,0138%	43,92%	38,31%	28,41%

Fonte: Autor.

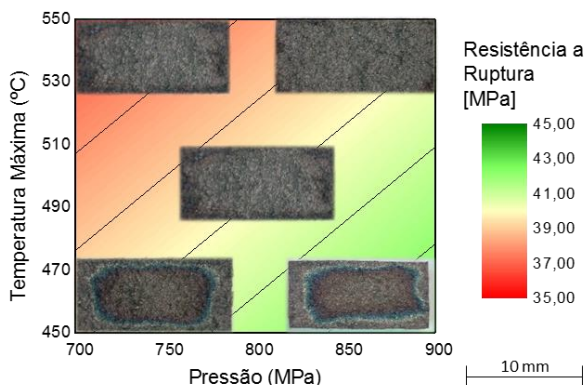
Figura 51 - Representação gráfica do modelo ótimo de (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Curto.



Fonte: Autor.

Além dos valores observados durante as medições, a superfície de fratura dessas amostras também não apresentou diferenças apreciáveis, confirmando a pouca influência dos efeitos dos parâmetros de processo do ponto de vista da distribuição da rede óxida para as amostras submetidas ao tratamento Curto como ilustrado na Figura 52.

Figura 52- Superfícies de fratura das amostras após ensaio de flexão 3 pontos sobrepostas ao gráfico de curvas de nível do modelo de resistência a ruptura para amostras submetidas ao tratamento Curto.



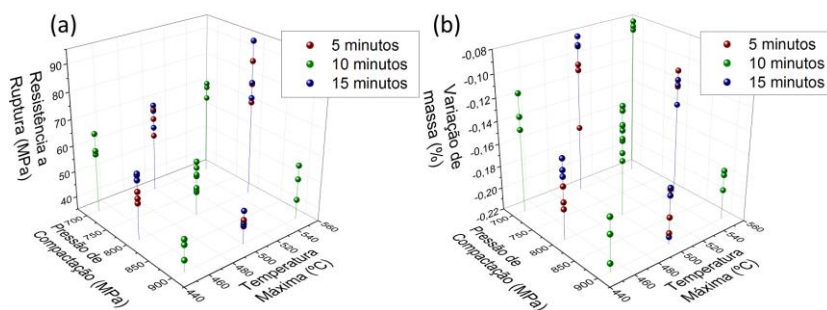
* Tempo de patamar fixado em 10 minutos.

Fonte: Autor.

Por outro lado, as amostras submetidas ao tratamento do tipo Longo apresentam uma resposta mais evidente em função das variáveis de processamento, sendo esse efeito maior do que a dispersão dos resultados como apresentam a distribuição dos pontos individuais da Figura 53. Percebe-se com esses resultados que existe uma tendência de obter maiores resistências a ruptura simultaneamente com o aumento na variação da massa, causado pela formação de uma rede óxida mais espessa entre as partículas. No entanto, tem-se um máximo para aumento da massa para a condição de 700 MPa de pressão, temperatura máxima de 550 °C e tempo de patamar de 10 minutos, enquanto que a maior resistência mecânica observada ocorre para pressão de 800 MPa, temperatura de 550 °C e tempo de patamar de 15 minutos. A diferença nesses pontos de máximo demonstra que não somente a condição de maior quantidade de óxidos é importante para alcançar maior resistência mecânica, mas também o tipo de óxido formado, sendo que a magnetita (Fe_3O_4) é mais indicada para aumento da resistência em relação à

hematita (Fe_2O_3). Uma vez que a razão de oxigênio-ferro nesses compostos é maior para a hematita, é possível alcançar maior variação de massa com a formação desse tipo de óxido, enquanto que a magnetita permite alcançar maior resistência mecânica. A formação preferencial desses óxidos certamente depende da temperatura, porém também é influenciada por outros fatores como a pressão parcial de oxigênio e de vapor de água na atmosfera do tratamento térmico. Uma vez que os tratamentos realizados nas amostras desse trabalho foram executados ao ar, variações na umidade relativa do ar entre os tratamentos podem ser uma provável causa da diferença entre os pontos máximos medidos de resistência a ruptura e da variação de massa.

Figura 53 - Distribuição dos pontos individuais relativo a (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa das amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

Os modelos gerados para resistência a ruptura e variação de massa das amostras submetidas ao tratamento Longo têm suas equações e coeficientes de regressão expostos na Tabela 14. Enquanto que os modelos para o tratamento Curto possuíam os coeficientes R^2 e suas variantes apresentando valores muito baixos, esses mesmos coeficientes para as amostras submetidas ao tratamento Longo são consideravelmente altos, demonstrando boa correlação dos dados medidos e modelados. No entanto, os altos valores de S em comparação com os valores de resistência a ruptura e variação de massa demonstram que, apesar de apresentar a mesma tendência dos resultados medidos, os modelos são pouco acurados, isto é, apresentam intervalos de predição muito largos. Sendo assim, o modelo, graficamente representado na Figura 54, prevê que maiores resistências mecânicas podem ser obtidas utilizando baixa pressão de compactação seguida de tratamento em alta temperatura por tempos de patamar mais longos, embora os valores médios previstos

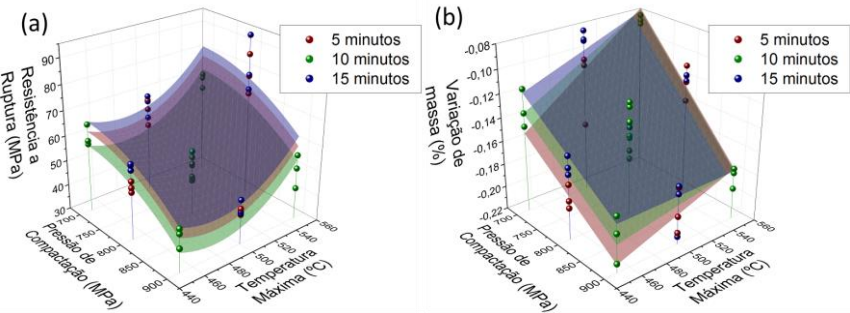
devam ser analisados com cautela devido ao largo intervalo de predição como apresentado na Tabela 15 para o ponto de mais alta resistência. Além disso, a variação de massa após o tratamento térmico segue tendência semelhante a apresentada pelo modelo de resistência a ruptura se tornando maior à medida que se trabalha com menores pressões de compactação, maior temperatura e maior tempo de patamar.

Tabela 14 - Equações e coeficientes dos modelos ótimos de resistência a ruptura e variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Longo.

Equação matemática de resistência a ruptura [MPa]			
$\sigma_{3P} = 736 + 0,612 P - 3,624 T - 5,65 t - 0,000442 P*P + 0,003784 T*T + 0,3017 t*t$			
S	R²	R²(adj)	R²(pred)
6,060	80,25%	77,13%	72,00%
Equação matemática de variação de massa (%)			
$\% \text{ massa} = (-1009 + 0,588 P + 2,347 T + 19,67 t - 0,001991 P*T - 0,0362 T*t)/1000$			
S	R²	R²(adj)	R²(pred)
0,0161%	83,95%	81,89%	79,22%

Fonte: Autor.

Figura 54 - Representação gráfica do modelo ótimo de (a) resistência a ruptura e (b) variação de massa para amostras submetidas ao tratamento Longo.



Fonte: Autor.

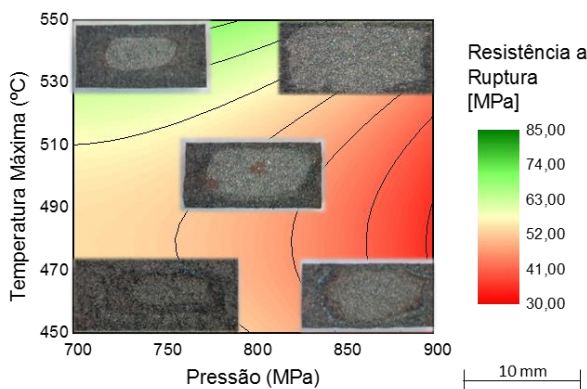
Tabela 15 - Intervalo de predição no ponto ótimo de resistência a ruptura e conjunto de parâmetros que levam à essa condição para amostras submetidas ao tratamento Longo.

Pressão de compactação [MPa]	Temperatura máxima [°C]	Tempo de patamar [minutos]	IP (95% de confiança) para resistência a ruptura [MPa]
700	550	15	69,14 - 96,18

Fonte: Autor.

Esses resultados estão de acordo com os reportados na literatura por outros autores (BUREŠ et al., 2012; GILBERT et al., 2004; GIMÉNEZ et al., 2006; OIKONOMOU et al., 2014). Sendo que a resistência mecânica desse material está correlacionada com a formação de uma rede de óxidos que ancora as partículas de ferro, a resistência será tão grande quanto mais espessa e melhor distribuída for a camada óxida gerada ao longo da seção transversal do componente. Dessa maneira, altas temperaturas e tempos mais prolongados nessas temperaturas promovem a formação de camadas de óxido de ferro (em especial, magnetita) mais espessas. Além disso, amostras compactadas utilizando menores pressões possuem uma estrutura com maior fração de porosidade aberta, a qual permite maior penetração de ar em regiões mais internas da seção transversal do componente durante o tratamento térmico. Esse efeito da pressão de compactação pode ser facilmente observado nas superfícies de fratura apresentadas na Figura 55, onde a região mais escura da fratura é aquela contendo a rede de óxido de ferro. Como é percebido pelas curvas de nível, as amostras compactadas usando menor pressão de compactação possuem maior resistência mecânica que as amostras compactadas com maior pressão e tratadas em mesma temperatura, graças a melhor distribuição da rede óxida.

Figura 55 - Superfícies de fratura das amostras após ensaio de flexão 3 pontos sobrepostas ao gráfico de curvas de nível do modelo de resistência a ruptura para amostras submetidas ao tratamento Longo.



* Tempo de patamar fixado em 10 minutos.

Fonte: Autor.

Além disso, as amostras tratadas em menor temperatura apresentam uma maior homogeneidade da rede óxida ao longo da seção, a qual também foi observado por Oikonomou *et al.* em amostras tratadas em 400 °C (OIKONOMOU *et al.*, 2014). Oikonomou atribuiu esse efeito à menor cinética de formação de óxidos nessa temperatura, levando a um reduzido fechamento da porosidade aberta, o que resulta em uma maior penetração do ar no interior da amostra, similar ao efeito ocorrido com relação a pressão de compactação já mencionado. No entanto, apesar da melhor distribuição, a rede de óxido formada nessas baixas temperaturas é normalmente composta de hematita, a qual possui resistência mecânica inferior à magnetita. Além disso, a cinética de formação de óxidos reduzida por efeito da baixa temperatura faz com que a rede de óxidos formada seja pouco espessa e de baixa resistência, resultando em componentes com baixa resistência mecânica quando comparado com os componentes tratados em alta temperatura.

Finalmente, comparando os resultados aqui expostos percebe-se uma diferença substancial na resposta mecânica entre as amostras submetidas aos tratamentos Curto e Longo. A justificativa para a maior resistência das amostras submetidas ao tratamento Longo é a presença do patamar de retirada de lubrificante durante esse ciclo. A remoção de lubrificante em baixa temperatura (320 °C) acaba por deixar uma porosidade comunicante no lugar antes ocupado pelo lubrificante, permitindo maior penetração de ar no interior da amostra em temperaturas superiores, formando redes de óxido de ferro mais extensas e bem distribuídas, e consequentemente mais resistentes após a finalização do tratamento em alta temperatura.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi utilizada a metodologia de superfícies de resposta baseadas em um planejamento de experimentos do tipo Box-Behnken, na qual as amostras foram produzidas com variação da pressão de compactação, temperatura máxima de tratamento térmico e tempo de patamar nessa temperatura para dois diferentes ciclos térmicos, aqui denominados Curto e Longo. Amostras a base do material compósito magnético mole comercial Somaloy® 3P 700 foram produzidas segundo o planejamento proposto e então caracterizadas em função de suas perdas magnéticas, resistividade elétrica e resistência a ruptura em ensaio de flexão 3 pontos, afim de se gerar modelos capazes de prever novas observações com base nos níveis utilizados para cada uma das variáveis de processamento citadas.

A metodologia utilizada gerou excelentes resultados de modelamento para a grande maioria das situações de medição de perdas magnéticas, para amostras submetidas aos dois tipos de tratamentos, apresentando valores médios de R^2_{pred} iguais a 78,36% para os modelos para o tratamento Curto e 76,07% para os modelos gerados para o tratamento Longo, que se traduz em uma excelente habilidade em prever novos resultados e com valores de erro padrão de regressão S representando menos que 2% das perdas otimizadas, configurando uma alta precisão na previsão com os modelos gerados.

Para os modelos de resistividade elétrica também foram exibidos altos valores de R^2_{pred} (83,61% e 86,48% respectivamente para os tratamentos Curto e Longo), no entanto os erros padrão de regressão são relativamente altos (181,09 e 251,18 $\mu\Omega.m$, respectivamente para os ciclos Curto e Longo), fazendo com que apesar da tendência apresentada pelo modelo seja coerente com os dados medidos, os intervalos de predição com um nível de confiança de 95% sejam demasiadamente largos, configurando então modelos que não são capazes de estabelecer com precisão a resistividade elétrica após o tratamento térmico.

Enquanto que o modelo de resistência a ruptura para as amostras submetidas ao tratamento Curto apresentou baixa coerência (R^2_{pred} igual 34,56%) entre os dados medidos e o melhor modelo gerado, o modelo definido para as amostras submetidas ao tratamento Longo demonstrou excelente correlação entre os dados medidos e modelados (R^2_{pred} igual a 72,00 %), embora também tenha apresentado um erro padrão de regressão relativamente alto ($S = 6,06$ Mpa), tornando o modelo pouco preciso. No entanto, apesar da imprecisão dos modelos para resistência a ruptura, a diferença entre os dois tipos de tratamento é bastante perceptível durante

as medições, sendo que o tratamento Longo produz amostras com resistências bastante superiores às aquelas apresentadas pelas amostras submetidas ao tratamento Curto.

Utilizando os modelos gerados para as perdas magnéticas (Apêndice A) foi possível observar os pontos ótimos de processamento para diversas situações de medição (Apêndice B). Nesses pontos ótimos observa-se praticamente uma constância da pressão de compactação ótima em 900 MPa e do tempo ótimo de patamar em 15 minutos. No entanto, a temperatura ótima do ponto de vista de perdas magnéticas depende fortemente das condições de frequência de magnetização e indução máxima da aplicação pretendida, sendo que quanto maiores a frequência e a indução, menor se torna a temperatura ótima. Além de haver certa diferença entre os pontos ótimos de processamento para as amostras submetidas aos tratamentos Curto e Longo, especialmente em relação à temperatura ótima, o valor das perdas magnéticas mínimas são, na maioria dos casos analisados, ligeiramente menores para as amostras submetidas ao tratamento Curto.

Em relação às propriedades elétricas, foi percebida uma forte queda da resistividade elétrica das amostras por efeito da temperatura de tratamento térmico, chegando a cerca de 90% de queda ao aumentar a temperatura de 450 para 550 °C. Essa mudança da resistividade está relacionada com a degradação da camada de fosfato, isolante elétrico presente inicialmente na superfície das partículas de ferro, e consequente aumentos do contato entre as partículas metálicas e da condutividade elétrica. Esses resultados permitiram compreender a razão por trás da mudança da temperatura ótima de tratamento térmico, em termos das perdas magnéticas, observada para diferentes condições de medição. A medida que a frequência de magnetização e a indução máxima de uma determinada operação se tornam maiores, também maiores serão as participações das perdas anômalas e por correntes parasitas na soma das perdas totais. Portanto, mesmo que as perdas totais ainda considerem a parcela de perdas histeréticas, as quais são menores quanto maior a temperatura de tratamento devido ao relaxamento das tensões causadas pelo processo de compactação, percebe-se a importância de realizar o tratamento térmico em uma temperatura mais baixa a fim de manter a integridade do isolamento elétrico, especialmente para componentes desejados para operar em altas frequências e induções máximas.

No tocante à resistência à ruptura em flexão, as amostras submetidas ao tratamento Curto apresentaram valores médios de 39,78 MPa e desvio padrão de 2,77 MPa, enquanto que para as amostras submetidas ao tratamento Longo foram obtidos valores tão altos quanto

93,9 MPa. Para esse segundo tipo de ciclo, foram previstas que as melhores condições de tratamento eram temperatura máxima de 550 °C, tempo de patamar de 15 minutos e uma pressão de compactação de 700 MPa.

Observa-se, portanto, um compromisso em termos da pressão de compactação e da temperatura de tratamento térmico para balancear as propriedades de perdas magnéticas e resistência mecânica dos componentes de acordo com a aplicação desejada considerando a frequência de magnetização, a indução magnética máxima e os requisitos de carga mecânica aplicada ao componente. Atingir esse compromisso pode agora ser facilitado pela possibilidade de previsão dessas propriedades em função do processamento através dos modelos gerados nesse trabalho para componentes a base de Somaloy® 3P 700.

Finalmente, a metodologia utilizada nessa investigação atingiu com êxito os objetivos propostos para o estudo de caso envolvendo o material compósito comercial Somaloy® 3P 700, podendo então ser expandida para diversos outros materiais compósitos magnéticos moles.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construção dos modelos de permeabilidade magnética relativa com base nas medidas realizadas com as amostras no formato de anel.
- Medição de resistividade elétrica dos anéis, realização dos cálculos de divisão de perdas e construção de modelos de previsão para as perdas magnéticas por histerese, por correntes parasitas e anômalas.
- Aumento do número de amostras no formato de barra como forma de diminuir os intervalos de predição para os modelos de resistividade elétrica e resistência a ruptura em flexão.
- Aplicação da metodologia apresentada em outros compósitos magnéticos moles.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, M. J.; WHITCOMB, P. J. **RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments**. 1. ed. New York: Productivity Press, 2005.

ANDERSSON, L. H. O. **Advances in SMC Technology – Materials and Applications** EURO PM2009. **Anais...**Copenhagen: 2009

BARBOZA, J. S. **Caracterização de Compósitos Magnéticos Macios Desenvolvidas Através da Metalurgia do Pó Aplicados a Núcleos de Máquinas Elétricas**. UFRGS, 2009.

BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 24, n. 1, p. 621–630, 1988.

BOEHM, A.; HAHN, I. **Comparison of soft magnetic composites (SMCs) and electrical steel**, 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC). **Anais...**IEEE, out. 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6425119>>. Acesso em: 7 mar. 2014

BUREŠ, R. et al. Microstructure and Fracture of Magnetic Composites with Vitroperm Addition. **Powder Metallurgy Progress**, v. 12, n. 3, p. 181–186, 2012.

CASTRO, N. A.; RODRIGUES, D.; LANDGRAF, F. J. G. **Dificuldades na Aplicação de Pós de Ferro Microencapsulados em Substituição a Aços Elétricos de Grão Não Orientado**. 59º Congresso Anual da ABM. **Anais...**São Paulo: 2004

CHAUDHARY, S. **Design of Experiments (DoE) & Development of Design Space**. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/shivang47/design-of-experiment-doe-development-of-design-space-ds-by-shivang-chaudhary>>. Acesso em: 5 set. 2015.

CREMONEZI, A. Materiais Magnéticos Moles. In: **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. 1. ed. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos e Científicos, 2009. p. 79–84.

CREMONEZI, A.; LOPES, H. SMC - Compósitos magnéticos moles. In: **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. 1. ed. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos e Científicos, 2009. p. 85–95.

CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2008.

DE WULF, M. et al. Magnetic properties and loss separation in iron powder soft magnetic composite materials. **Journal of Applied Physics**, v. 91, n. 10, p. 7845, 13 maio 2002.

ESTATCAMP. **Superfície de Resposta - Planejamento de Experimento | Portal Action**. Disponível em:

<<http://www.portalaction.com.br/planejamento-de-experimento/superficie-de-resposta>>. Acesso em: 6 out. 2015.

FERREIRA, S. L. C. et al. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. **Analytica Chimica Acta**, v. 597, n. 2, p. 179–186, 2007.

GILBERT, I. et al. Effects of processing upon the properties of soft magnetic composites for low loss applications. **Journal of Materials Science**, v. 39, n. 2, p. 457–461, jan. 2004.

GIMÉNEZ, S. et al. Effects of microstructural heterogeneity on the mechanical properties of pressed soft magnetic composite bodies. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 419, n. 1-2, p. 299–305, ago. 2006.

GORKUNOV, E. S.; DRAGOSHANSKY, Y. N. **Interaction Between domain walls and structural defects as a background for magnetic inspection of steel structures**, Proceedings of the 15th World Conference on Nondestructive Testing. **Anais...Roma**: 2000

GUO, Y. et al. Development of a PM Transverse Flux Motor With Soft Magnetic Composite Core. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 2, p. 426–434, jun. 2006.

GUTFLEISCH, O. et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. **Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)**, v. 23, n. 7, p. 821–42, 15 fev. 2011.

HÖGANÄS. **Somaloy® Technology for Electric Motors**. Disponível em: <https://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepoint-documents/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/Somaloy_Technology_for_Electric_Motors.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2014.

HÖGANÄS. **Iron powders and metal powder technology - Höganäs**. Disponível em: <<http://www.hoganas.com/>>. Acesso em: 3 abr. 2014.

HOWE, D. Influence of soft magnetic materials on the design and performance of tubular permanent magnet machines. **IEEE Transactions**

on Magnetism, v. 41, n. 10, p. 4057–4059, out. 2005.

HULTMAN, L.; YE, Z. Soft Magnetic Composites – Properties and Applications. p. 1–13, 2002.

JACK, A. G.; MECROW, B. C.; DICKINSON, P. G. **Iron loss in machines with powdered iron stators**, IEEE International Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No.99EX272). **Anais...IEEE**, 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=769023>>. Acesso em: 30 set. 2015

KOLLÁR, P. et al. Power loss separation in Fe-based composite materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 327, p. 146–150, fev. 2013.

LALL, C. **Soft magnetism: Fundamentals for powder metallurgy and metal injection molding**. New Jersey: Metal Powder Industry, 1992.

LIEW, G. S. et al. **Analysis of a Segmented Brushless PM Machine Utilising Soft Magnetic Composites**, IECON 2007. **Anais...Taipei**: 2007

MAGNUSSEN, F. et al. **Analysis of a PM Machine with Concentrated Fractional Pitch Windings**, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE). **Anais...Trondheim**: 2004

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUNBELE, N. F. **Estatística aplicada à engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

NOLAN, W. R. **Electrically Insulating Phosphate Coatings for Iron Powder Based Electromagnetic Core Applications**. Massachusetts Institute of Technology, 2009.

OIKONOMOU, C. et al. Effect of heat treatment in air on surface composition of iron-phosphate based soft magnetic composite components. **Materials Science and Engineering: B**, v. 189, p. 90–99, nov. 2014.

PENNANDER, L.; JACK, A. G. **Soft Magnetic Iron Powder Materials AC Properties and their Application in Electrical Machines** EURO PM2003. **Anais...Valencia**: 2003

PERSSON, M.; NORD, G.; JACK, A. G. **Soft Magnetic Iron Powder Materials AC Properties and their Application in Electrical Machines**,

Euro PM 2003. **Anais...**2003. Disponível em:

<<http://www.mirdc.org.tw/FileDownload/Proseminar/2006171441424241A.pdf>>

RODRIGUES, V. I. DOS S. **Elaboração e caracterização de compósitos magnéticos**. UFRGS, 2009.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K. Soft magnetic composite materials (SMCs). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 189, n. 1-3, p. 1–12, jul. 2007.

SKARRIE, H. **Design of Powder Core**. Lund University, 2001.

SLUSAREK, B. et al. Characteristics of Power Loss in SMC a Key for Desining the Best Values of Technological Parameters. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 581, p. 699–704, 20 abr. 2013.

ŚLUSAREK, B. et al. The effects of excitation conditions and annealing temperature on power loss in SMC cores. **Przegląd Elektrotechniczny**, v. 4, p. 16–21, 1 abr. 2015.

WASHINGTON, J. G.; POMPERMAIER, C.; SJÖBERG, L. **Application of the latest Soft Magnetic Composites to a Hybrid Brushless DC Motor for a Compressor Application**, 22nd SMM Conference. **Anais...**São Paulo: 2015

APÊNDICE A – Superfícies de Resposta para Perdas Magnéticas

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,1	50	Curto	= 0,2877 - 0,000020 P - 0,000358 T - 0,00983 t + 0,000019 T*t	0,005	75,66%	65,92%	29,34%
0,1	60	Curto	= 0,391 + 0,000873 P - 0,00223 T - 0,000334 t + 0,000003 T*T - 0,000002 P*T	0,009	74,30%	60,03%	23,96%
0,1	100	Curto	= 1,093 - 0,000036 P - 0,002850 T - 0,01141 t + 0,000002 T*T - 0,000004 P*t + 0,000026 T*t	0,005	95,59%	92,28%	85,20%
0,1	200	Curto	= 1,840 + 0,000026 P - 0,00463 T - 0,0201 t + 0,000003 T*T - 0,000013 P*t + 0,000056 T*t	0,008	96,08%	93,14%	82,42%
0,1	300	Curto	= 2,943 + 0,000072 P - 0,007961 T - 0,02137 t + 0,000006 T*T - 0,000017 P*t + 0,000064 T*t	0,005	99,29%	98,76%	96,83%
0,1	400	Curto	= 4,481 + 0,000251 P - 0,01337 T - 0,0201 t + 0,000011 T*T - 0,000036 P*t + 0,000091 T*t	0,01	97,85%	96,23%	90,58%
0,1	500	Curto	= 5,362 + 0,000208 P - 0,01519 T - 0,0410 t + 0,000012 T*T - 0,000036 P*t + 0,000130 T*t	0,009	98,90%	98,07%	97,61%
0,1	600	Curto	= 7,057 + 0,000257 P - 0,02075 T - 0,0544 t + 0,000017 T*T - 0,000042 P*t + 0,000165 T*t	0,016	97,22%	95,13%	90,28%
0,1	700	Curto	= 8,173 + 0,000338 P - 0,02393 T - 0,0713 t + 0,000020 T*T - 0,000052 P*t + 0,000213 T*t	0,015	98,12%	96,70%	92,11%
0,1	800	Curto	= 10,25 + 0,000295 P - 0,03117 T - 0,0703 t + 0,000027 T*T - 0,000053 P*t + 0,000210 T*t	0,022	96,45%	93,80%	83,37%
0,1	900	Curto	= 12,24 + 0,000312 P - 0,03729 T - 0,1049 t + 0,000033 T*T - 0,000053 P*t + 0,000277 T*t	0,025	96,61%	94,07%	87,01%
0,1	1000	Curto	= 13,68 + 0,000302 P - 0,04206 T - 0,1020 t + 0,000037 T*T - 0,000055 P*t + 0,000276 T*t	0,033	94,75%	90,81%	73,20%
0,1	50	Longo	= 0,1346 + 0,000003 P - 0,000146 T + 0,00552 t - 0,000268 t*t	0,004	76,75%	67,44%	40,77%
0,1	60	Longo	= 0,208 + 0,000584 P - 0,001100 T - 0,001037 t - 0,000000 P*P + 0,000001 T*T	0,003	92,98%	89,08%	78,15%
0,1	100	Longo	= 1,088 - 0,000066 P - 0,00308 T - 0,000579 t + 0,000003 T*T	0,006	86,49%	81,08%	66,72%
0,1	200	Longo	= 2,142 - 0,000916 P - 0,00476 T - 0,001593 t + 0,000003 T*T + 0,000002 P*T	0,006	96,07%	93,89%	86,44%
0,1	300	Longo	= 2,960 - 0,000132 P - 0,00821 T - 0,002211 t + 0,000007 T*T	0,007	97,38%	96,33%	94,80%
0,1	400	Longo	= 4,013 - 0,000162 P - 0,01133 T - 0,001899 t + 0,000010 T*T	0,011	95,91%	94,27%	90,89%
0,1	500	Longo	= 5,086 - 0,000177 P - 0,01453 T - 0,00176 t + 0,000013 T*T	0,015	94,29%	92,01%	87,32%
0,1	600	Longo	= 6,635 - 0,000215 P - 0,01956 T - 0,00323 t + 0,000018 T*T	0,016	95,43%	93,60%	90,64%
0,1	700	Longo	= 8,250 - 0,000274 P - 0,02474 T - 0,00303 t + 0,000023 T*T	0,016	96,44%	95,01%	92,52%
0,1	800	Longo	= 9,68 - 0,000376 P - 0,02838 T - 0,0388 t + 0,000026 T*T + 0,000070 T*t	0,021	95,71%	93,32%	88,40%
0,1	900	Longo	= 11,48 - 0,000359 P - 0,03457 T - 0,0429 t + 0,000032 T*T + 0,000080 T*t	0,024	95,22%	92,56%	87,32%
0,1	1000	Longo	= 12,66 - 0,000494 P - 0,03864 T - 0,00384 t + 0,000037 T*T	0,023	95,83%	94,17%	91,66%
0,2	50	Curto	= 1,571 + 0,000058 P - 0,00414 T - 0,00743 t + 0,000003 T*T - 0,000011 P*t + 0,000030 T*t	0,006	97,37%	95,40%	89,84%
0,2	60	Curto	= 1,497 + 0,000155 P - 0,00352 T - 0,0050 t + 0,000002 T*T - 0,000023 P*t + 0,000043 T*t	0,012	94,39%	90,19%	78,78%
0,2	100	Curto	= 3,118 - 0,000107 P - 0,00738 T - 0,0305 t + 0,000005 T*T - 0,000010 P*t + 0,000070 T*t	0,01	97,87%	96,27%	94,59%
0,2	200	Curto	= 5,877 + 0,000141 P - 0,01453 T - 0,0302 t + 0,000011 T*T - 0,000048 P*t + 0,000126 T*t	0,013	99,09%	98,41%	96,44%
0,2	300	Curto	= 9,51 + 0,000042 P - 0,02378 T - 0,0789 t + 0,000018 T*T - 0,000054 P*t + 0,000227 T*t	0,002	98,95%	98,16%	95,70%
0,2	400	Curto	= 13,24 + 0,000555 P - 0,03525 T - 0,0803 t + 0,000028 T*T - 0,000104 P*t + 0,000304 T*t	0,025	99,07%	98,37%	95,65%

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,2	500	Curto	= 17,31 + 0,000398 P - 0,04626 T - 0,1262 t + 0,000037 T*T - 0,000107 P*t + 0,000396 T*t	0,033	98,80%	97,91%	94,88%
0,2	600	Curto	= 23,33 + 0,000747 P - 0,0662 T - 0,1662 t + 0,000055 T*T - 0,000149 P*t + 0,000540 T*t	0,055	97,43%	95,51%	88,86%
0,2	700	Curto	= 27,27 + 0,000742 P - 0,0773 T - 0,1966 t + 0,000065 T*T - 0,000168 P*t + 0,000629 T*t	0,064	97,16%	95,04%	87,29%
0,2	800	Curto	= 33,87 + 0,000621 P - 0,0983 T - 0,254 t + 0,000084 T*T - 0,000168 P*t + 0,000738 T*t	0,092	95,32%	91,80%	77,37%
0,2	900	Curto	= 40,10 + 0,000995 P - 0,1189 T - 0,298 t + 0,000103 T*T - 0,000212 P*t + 0,000889 T*t	0,092	96,13%	93,22%	81,56%
0,2	1000	Curto	= 46,52 + 0,00146 P - 0,1406 T - 0,342 t + 0,000123 T*T - 0,000253 P*t + 0,001044 T*t	0,104	95,80%	92,65%	77,76%
0,2	50	Longo	= 0,6150 - 0,000032 P - 0,000516 T - 0,000337 t	0,007	89,92%	87,17%	80,17%
0,2	60	Longo	= 0,035 + 0,001675 P - 0,000562 T - 0,001218 t - 0,000001 P*P	0,01	87,33%	82,26%	69,40%
0,2	100	Longo	= 2,434 - 0,000135 P - 0,00561 T - 0,001959 t + 0,000005 T*T	0,009	96,48%	95,07%	92,59%
0,2	200	Longo	= 6,45 - 0,000341 P - 0,01700 T - 0,00389 t + 0,000015 T*T	0,022	95,67%	93,94%	90,55%
0,2	300	Longo	= 10,10 - 0,000502 P - 0,02721 T - 0,00584 t + 0,000024 T*T	0,029	96,29%	94,80%	92,37%
0,2	400	Longo	= 13,07 - 0,000622 P - 0,03491 T - 0,00694 t + 0,000031 T*T	0,038	96,00%	94,40%	91,86%
0,2	500	Longo	= 18,87 - 0,000798 P - 0,0539 T - 0,00621 t + 0,000050 T*T	0,058	93,61%	91,05%	86,77%
0,2	600	Longo	= 22,26 - 0,001015 P - 0,0628 T - 0,01062 t + 0,000058 T*T	0,062	94,64%	92,50%	88,93%
0,2	700	Longo	= 28,15 - 0,001223 P - 0,0818 T - 0,01108 t + 0,000076 T*T	0,071	94,69%	92,56%	88,89%
0,2	800	Longo	= 33,06 - 0,001504 P - 0,0969 T - 0,01025 t + 0,000091 T*T	0,089	93,25%	90,54%	86,00%
0,2	900	Longo	= 38,86 - 0,001503 P - 0,1162 T - 0,00813 t + 0,000110 T*T	0,097	93,10%	90,33%	85,84%
0,2	1000	Longo	= 44,64 - 0,001847 P - 0,1348 T - 0,01071 t + 0,000129 T*T	0,105	92,92%	90,09%	85,51%
0,3	50	Curto	= 2,130 - 0,000006 P - 0,00386 T - 0,0130 t + 0,000002 T*T - 0,000021 P*t + 0,000053 T*t	0,011	97,81%	96,17%	93,16%
0,3	60	Curto	= 3,600 + 0,000249 P - 0,00966 T - 0,0031 t + 0,000007 T*T - 0,000045 P*t + 0,000072 T*t	0,012	97,95%	96,41%	93,37%
0,3	100	Curto	= 5,046 + 0,000134 P - 0,01102 T - 0,0336 t + 0,000007 T*T - 0,000052 P*t + 0,000138 T*t	0,012	99,21%	98,61%	96,91%
0,3	200	Curto	= 10,38 + 0,000244 P - 0,02354 T - 0,0341 t + 0,000016 T*T - 0,000107 P*t + 0,000218 T*t	0,023	99,26%	98,70%	96,55%
0,3	300	Curto	= 18,15 + 0,000542 P - 0,04559 T - 0,0903 t + 0,000035 T*T - 0,000156 P*t + 0,000401 T*t	0,038	99,00%	98,25%	95,68%
0,3	400	Curto	= 26,05 + 0,000922 P - 0,0684 T - 0,1331 t + 0,000054 T*T - 0,000223 P*t + 0,000583 T*t	0,053	98,82%	97,94%	95,19%
0,3	500	Curto	= 33,78 + 0,001290 P - 0,0908 T - 0,1528 t + 0,000073 T*T - 0,000291 P*t + 0,000725 T*t	0,073	98,46%	97,31%	93,59%
0,3	600	Curto	= 45,51 + 0,00135 P - 0,1273 T - 0,261 t + 0,000106 T*T - 0,000324 P*t + 0,000989 T*t	0,107	97,52%	95,66%	89,05%
0,3	700	Curto	= 54,62 + 0,00156 P - 0,1545 T - 0,334 t + 0,000131 T*T - 0,000359 P*t + 0,001184 T*t	0,142	96,37%	93,64%	82,58%
0,3	800	Curto	= 67,58 + 0,00169 P - 0,1957 T - 0,447 t + 0,000168 T*T - 0,000396 P*t + 0,001462 T*t	0,17	95,93%	92,88%	79,61%
0,3	900	Curto	= 81,7 + 0,00166 P - 0,2425 T - 0,547 t + 0,000212 T*T - 0,000390 P*t + 0,001655 T*t	0,206	94,78%	90,86%	73,52%
0,3	1000	Curto	= 95,3 + 0,00265 P - 0,2885 T - 0,636 t + 0,000254 T*T - 0,000506 P*t + 0,002011 T*t	0,231	94,50%	90,37%	70,91%
0,3	50	Longo	= 1,3235 - 0,000149 P - 0,001008 T - 0,001369 t	0,014	91,48%	89,15%	83,24%

B_{\max} [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,3	60	Longo	= 2,533 - 0,000246 P - 0,00473 T - 0,002436 t + 0,000004 T*t	0,013	95,51%	93,71%	90,04%
0,3	100	Longo	= 3,629 - 0,000341 P - 0,00584 T - 0,00373 t + 0,000004 T*t	0,017	96,57%	95,19%	92,66%
0,3	200	Longo	= 10,09 - 0,000697 P - 0,02281 T - 0,00672 t + 0,000019 T*t	0,044	94,41%	92,18%	88,04%
0,3	300	Longo	= 15,83 - 0,001167 P - 0,0363 T - 0,01102 t + 0,000031 T*t	0,061	95,21%	93,30%	89,98%
0,3	400	Longo	= 22,26 - 0,001509 P - 0,0532 T - 0,01233 t + 0,000047 T*t	0,081	94,65%	92,52%	89,23%
0,3	500	Longo	= 30,73 - 0,001794 P - 0,0785 T - 0,01203 t + 0,000071 T*t	0,104	93,78%	91,29%	87,65%
0,3	600	Longo	= 41,69 - 0,002058 P - 0,1136 T - 0,01442 t + 0,000105 T*t	0,139	91,92%	88,69%	83,21%
0,3	700	Longo	= 51,42 - 0,002556 P - 0,1432 T - 0,0158 t + 0,000134 T*t	0,154	92,22%	89,10%	83,95%
0,3	800	Longo	= 62,89 - 0,002892 P - 0,1799 T - 0,0157 t + 0,000169 T*t	0,192	90,74%	87,04%	80,37%
0,3	900	Longo	= 73,9 - 0,003473 P - 0,2141 T - 0,0210 t + 0,000203 T*t	0,211	90,74%	87,04%	81,09%
0,3	1000	Longo	= 84,5 - 0,003875 P - 0,2478 T - 0,0190 t + 0,000237 T*t	0,23	90,38%	86,53%	80,26%
0,4	50	Curto	= 3,262 - 0,000227 P - 0,00478 T - 0,0326 t + 0,000002 T*t - 0,000017 P*t + 0,000084 T*t	0,015	98,45%	97,29%	93,06%
0,4	60	Curto	= 4,60 + 0,000238 P - 0,00994 T - 0,0089 t + 0,000006 T*t - 0,000073 P*t + 0,000122 T*t	0,022	97,75%	96,06%	93,00%
0,4	100	Curto	= 7,92 + 0,000271 P - 0,01741 T - 0,0268 t + 0,000012 T*t - 0,000092 P*t + 0,000183 T*t	0,029	98,39%	97,17%	93,42%
0,4	200	Curto	= 16,89 + 0,000217 P - 0,03759 T - 0,0942 t + 0,000026 T*t - 0,000144 P*t + 0,000384 T*t	0,034	99,36%	98,88%	97,28%
0,4	300	Curto	= 28,25 + 0,000549 P - 0,0684 T - 0,1582 t + 0,000051 T*t - 0,000225 P*t + 0,000632 T*t	0,066	98,79%	97,88%	94,81%
0,4	400	Curto	= 43,77 + 0,00115 P - 0,1165 T - 0,214 t + 0,000094 T*t - 0,000330 P*t + 0,000898 T*t	0,108	98,02%	96,54%	91,66%
0,4	500	Curto	= 55,58 + 0,00158 P - 0,1487 T - 0,303 t + 0,000121 T*t - 0,000426 P*t + 0,001218 T*t	0,131	97,91%	96,34%	91,15%
0,4	600	Curto	= 74,89 + 0,00216 P - 0,2114 T - 0,397 t + 0,000179 T*t - 0,000524 P*t + 0,001560 T*t	0,188	96,80%	94,40%	85,04%
0,4	700	Curto	= 91,7 + 0,00251 P - 0,2635 T - 0,515 t + 0,000226 T*t - 0,000576 P*t + 0,001875 T*t	0,245	95,54%	92,19%	78,61%
0,4	800	Curto	= 114,1 + 0,00321 P - 0,3375 T - 0,697 t + 0,000294 T*t - 0,000672 P*t + 0,002381 T*t	0,305	94,43%	90,25%	72,93%
0,4	900	Curto	= 134,2 + 0,00305 P - 0,4003 T - 0,887 t + 0,000353 T*t - 0,000716 P*t + 0,002826 T*t	0,345	93,91%	89,33%	70,80%
0,4	1000	Curto	= 161,2 + 0,00437 P - 0,4945 T - 1,048 t + 0,000441 T*t - 0,000862 P*t + 0,003382 T*t	0,397	93,32%	88,31%	66,28%
0,4	50	Longo	= 2,1731 - 0,000333 P - 0,001521 T - 0,00190 t	0,017	94,56%	93,07%	90,21%
0,4	60	Longo	= 2,553 - 0,000395 P - 0,001729 T - 0,00231 t	0,024	92,27%	90,16%	86,09%
0,4	100	Longo	= 4,306 - 0,000661 P - 0,002864 T - 0,00556 t	0,031	95,10%	93,76%	90,96%
0,4	200	Longo	= 8,597 - 0,001343 P - 0,005363 T - 0,01150 t	0,07	93,23%	91,38%	87,30%
0,4	300	Longo	= 21,38 - 0,001793 P - 0,0428 T - 0,01272 t + 0,000035 T*t	0,102	93,32%	90,64%	86,00%
0,4	400	Longo	= 33,27 - 0,002412 P - 0,0761 T - 0,0151 t + 0,000067 T*t	0,142	91,99%	88,78%	83,66%
0,4	500	Longo	= 43,57 - 0,003046 P - 0,1030 T - 0,0158 t + 0,000093 T*t	0,183	90,40%	86,56%	79,84%
0,4	600	Longo	= 59,7 - 0,003564 P - 0,1526 T - 0,0202 t + 0,000141 T*t	0,218	90,30%	86,42%	80,09%
0,4	700	Longo	= 74,9 - 0,004448 P - 0,1977 T - 0,0225 t + 0,000185 T*t	0,256	89,91%	85,87%	79,12%
0,4	800	Longo	= 87,9 - 0,00538 P - 0,2343 T - 0,0218 t + 0,000221 T*t	0,297	89,09%	84,73%	77,63%

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,4	900	Longo	= 107,3 - 0,00603 P - 0,2977 T - 0,0260 t + 0,000284 T*t	0,359	86,80%	81,51%	73,01%
0,4	1000	Longo	= 127,8 - 0,00680 P - 0,3641 T - 0,0290 t + 0,000351 T*t	0,39	87,18%	82,05%	73,68%
0,5	50	Curto	= 4,54 + 0,000145 P - 0,00791 T - 0,0165 t + 0,000004 T*T - 0,000057 P*t + 0,000113 T*t	0,026	97,34%	95,35%	88,39%
0,5	60	Curto	= 6,761 + 0,000369 P - 0,01530 T - 0,0170 t + 0,000010 T*T - 0,000087 P*t + 0,000157 T*t	0,017	99,17%	98,54%	96,22%
0,5	100	Curto	= 10,47 + 0,000410 P - 0,02151 T - 0,0362 t + 0,000013 T*T - 0,000128 P*t + 0,000255 T*t	0,03	99,07%	98,37%	95,86%
0,5	200	Curto	= 23,27 + 0,000771 P - 0,0517 T - 0,0999 t + 0,000036 T*T - 0,000233 P*t + 0,000530 T*t	0,073	98,52%	97,41%	93,87%
0,5	300	Curto	= 40,96 + 0,00083 P - 0,1003 T - 0,210 t + 0,000076 T*T - 0,000332 P*t + 0,000894 T*t	0,099	98,59%	97,53%	94,10%
0,5	400	Curto	= 60,13 + 0,00146 P - 0,1554 T - 0,310 t + 0,000124 T*T - 0,000487 P*t + 0,001318 T*t	0,119	98,93%	97,87%	93,09%
0,5	500	Curto	= 82,0 + 0,00285 P - 0,2241 T - 0,375 t + 0,000186 T*T - 0,000669 P*t + 0,001728 T*t	0,203	97,44%	95,52%	88,46%
0,5	600	Curto	= 110,9 + 0,00329 P - 0,3177 T - 0,569 t + 0,000272 T*T - 0,000776 P*t + 0,002285 T*t	0,279	96,27%	93,47%	82,74%
0,5	700	Curto	= 139,5 + 0,00370 P - 0,4089 T - 0,785 t + 0,000356 T*T - 0,000859 P*t + 0,002836 T*t	0,344	95,45%	92,04%	78,76%
0,5	800	Curto	= 170,9 + 0,00499 P - 0,5123 T - 1,039 t + 0,000451 T*T - 0,001047 P*t + 0,003636 T*t	0,417	94,64%	90,62%	74,45%
0,5	900	Curto	= 204,7 + 0,00550 P - 0,625 T - 1,285 t + 0,000559 T*T - 0,001095 P*t + 0,004218 T*t	0,493	93,53%	88,67%	68,30%
0,5	1000	Curto	= 242,9 + 0,00641 P - 0,756 T - 1,536 t + 0,000682 T*T - 0,001214 P*t + 0,00490 T*t	0,617	91,70%	85,47%	55,78%
0,5	50	Longo	= 2,914 - 0,000413 P - 0,001843 T - 0,00283 t	0,025	92,42%	90,35%	87,02%
0,5	60	Longo	= 3,669 - 0,000603 P - 0,002330 T - 0,00450 t	0,037	90,16%	87,47%	81,02%
0,5	100	Longo	= 6,067 - 0,000953 P - 0,003797 T - 0,00727 t	0,043	94,75%	93,31%	90,62%
0,5	200	Longo	= 11,925 - 0,001758 P - 0,006972 T - 0,01454 t	0,09	93,39%	91,59%	87,99%
0,5	300	Longo	= 27,44 - 0,002658 P - 0,0485 T - 0,0171 t + 0,000039 T*T	0,144	92,39%	89,35%	84,15%
0,5	400	Longo	= 40,7 - 0,003829 P - 0,0801 T - 0,0226 t + 0,000068 T*T	0,202	90,97%	87,36%	81,33%
0,5	500	Longo	= 56,2 - 0,004506 P - 0,1225 T - 0,0187 t + 0,000110 T*T	0,249	89,54%	85,35%	78,46%
0,5	600	Longo	= 76,5 - 0,00544 P - 0,1823 T - 0,0235 t + 0,000168 T*T	0,314	87,87%	83,02%	74,93%
0,5	700	Longo	= 98,6 - 0,00658 P - 0,2488 T - 0,0261 t + 0,000234 T*T	0,373	86,99%	81,78%	72,95%
0,5	800	Longo	= 120,7 - 0,00799 P - 0,3146 T - 0,0257 t + 0,000299 T*T	0,447	85,77%	80,08%	70,24%
0,5	900	Longo	= 148,2 - 0,00888 P - 0,404 T - 0,0312 t + 0,000389 T*T	0,524	83,96%	77,55%	66,99%
0,5	1000	Longo	= 173,2 - 0,01019 P - 0,481 T - 0,0333 t + 0,000467 T*T	0,567	84,63%	78,48%	68,30%
0,6	50	Curto	= 8,19 + 0,000319 P - 0,01915 T - 0,0152 t + 0,000013 T*T - 0,000101 P*t + 0,000179 T*t	0,021	99,17%	98,54%	95,31%
0,6	60	Curto	= 11,82 + 0,000415 P - 0,03142 T + 0,0162 t + 0,000025 T*T - 0,000112 P*t + 0,000131 T*t	0,042	97,88%	96,28%	92,45%
0,6	100	Curto	= 14,63 + 0,000394 P - 0,03069 T - 0,0525 t + 0,000020 T*T - 0,000174 P*t + 0,000354 T*t	0,039	99,15%	98,51%	95,90%
0,6	200	Curto	= 32,32 + 0,00057 P - 0,0727 T - 0,130 t + 0,000052 T*T - 0,000302 P*t + 0,000683 T*t	0,107	98,21%	96,87%	92,44%
0,6	300	Curto	= 55,00 + 0,00243 P - 0,1392 T - 0,165 t + 0,000108 T*T - 0,000575 P*t + 0,001163 T*t	0,164	97,80%	96,16%	90,27%
0,6	400	Curto	= 79,7 + 0,00277 P - 0,2076 T - 0,324 t + 0,000166 T*T - 0,000700 P*t + 0,001661 T*t	0,218	97,65%	95,88%	88,26%
0,6	500	Curto	= 115,4 + 0,00335 P - 0,3210 T - 0,492 t + 0,000271 T*T - 0,000842 P*t + 0,002201 T*t	0,346	95,86%	92,75%	78,66%

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,6	600	Curto	= 154,1 + 0,00466 P - 0,4478 T - 0,676 t + 0,000389 T*T - 0,001057 P*t + 0,002905 T*t	0,435	94,99%	91,23%	74,10%
0,6	700	Curto	= 194,4 + 0,00546 P - 0,580 T - 0,950 t + 0,000512 T*T - 0,001160 P*t + 0,00361 T*t	0,584	92,72%	87,27%	60,07%
0,6	800	Curto	= 239,0 + 0,00711 P - 0,730 T - 1,197 t + 0,000654 T*T - 0,001342 P*t + 0,00438 T*t	0,762	90,05%	82,58%	44,64%
0,6	900	Curto	= 297,5 - 0,00640 P - 0,888 T - 2,68 t + 0,000805 T*T + 0,00518 T*t	1,007	83,70%	74,64%	39,73%
0,6	1000	Curto	= 354,4 - 0,00714 P - 1,080 T - 3,18 t + 0,000987 T*T + 0,00619 T*t	1,15	82,48%	72,74%	34,90%
0,6	50	Longo	= 4,099 - 0,000616 P - 0,002685 T - 0,00442 t	0,028	95,27%	93,98%	92,19%
0,6	60	Longo	= 4,650 - 0,000780 P - 0,002746 T - 0,00078 t	0,046	89,50%	86,64%	82,34%
0,6	100	Longo	= 7,702 - 0,001052 P - 0,004642 T - 0,00449 t	0,059	93,13%	91,25%	88,19%
0,6	200	Longo	= 15,553 - 0,002427 P - 0,008375 T - 0,00999 t	0,131	90,90%	88,42%	83,10%
0,6	300	Longo	= 23,635 - 0,003735 P - 0,01195 T - 0,0213 t	0,195	90,71%	88,17%	83,08%
0,6	400	Longo	= 56,2 - 0,004970 P - 0,1138 T - 0,0313 t + 0,000099 T*T	0,276	89,97%	85,96%	78,88%
0,6	500	Longo	= 79,0 - 0,00627 P - 0,1774 T - 0,0280 t + 0,000161 T*T	0,347	88,36%	83,70%	75,62%
0,6	600	Longo	= 105,0 - 0,00753 P - 0,2532 T - 0,0349 t + 0,000236 T*T	0,438	86,21%	80,69%	71,11%
0,6	700	Longo	= 138,4 - 0,00924 P - 0,356 T - 0,0404 t + 0,000338 T*T	0,508	86,41%	80,97%	71,45%
0,6	800	Longo	= 175,3 - 0,01115 P - 0,472 T - 0,0467 t + 0,000454 T*T	0,638	84,50%	78,29%	66,69%
0,6	900	Longo	= 211,9 - 0,01268 P - 0,589 T - 0,0515 t + 0,000571 T*T	0,755	82,76%	75,86%	63,33%
0,6	1000	Longo	= 244,8 - 0,01395 P - 0,693 T - 0,0443 t + 0,000677 T*T	0,83	82,17%	75,04%	61,85%
0,7	50	Curto	= 10,15 + 0,000099 P - 0,0221 T - 0,0396 t + 0,000015 T*T - 0,000089 P*t + 0,000203 T*t	0,052	96,85%	94,49%	89,57%
0,7	60	Curto	= 14,72 - 0,000346 P - 0,0359 T - 0,0832 t + 0,000028 T*T - 0,000048 P*t + 0,000226 T*t	0,063	96,33%	93,58%	84,18%
0,7	100	Curto	= 20,76 + 0,000478 P - 0,0473 T - 0,076 t + 0,000033 T*T - 0,000211 P*t + 0,000443 T*t	0,08	97,73%	96,03%	90,62%
0,7	200	Curto	= 42,48 + 0,00121 P - 0,0977 T - 0,157 t + 0,000070 T*T - 0,000444 P*t + 0,000937 T*t	0,135	98,30%	97,02%	92,54%
0,7	300	Curto	= 75,48 + 0,00202 P - 0,1915 T - 0,427 t + 0,000149 T*T - 0,000630 P*t + 0,001752 T*t	0,165	98,66%	97,66%	94,55%
0,7	400	Curto	= 113,0 + 0,00343 P - 0,3050 T - 0,615 t + 0,000249 T*T - 0,000866 P*t + 0,002474 T*t	0,269	97,82%	96,19%	90,38%
0,7	500	Curto	= 162,2 + 0,00399 P - 0,4621 T - 0,928 t + 0,000393 T*T - 0,001062 P*t + 0,003389 T*t	0,362	97,21%	95,12%	88,04%
0,7	600	Curto	= 219,1 + 0,00510 P - 0,650 T - 1,313 t + 0,000568 T*T - 0,001253 P*t + 0,00445 T*t	0,544	95,30%	91,77%	78,64%
0,7	700	Curto	= 272,3 + 0,00572 P - 0,820 T - 1,819 t + 0,000725 T*T - 0,001342 P*t + 0,00558 T*t	0,737	93,14%	87,99%	67,76%
0,7	800	Curto	= 337,5 + 0,00737 P - 1,039 T - 2,44 t + 0,000929 T*T - 0,001551 P*t + 0,00714 T*t	0,872	92,32%	86,55%	64,63%
0,7	900	Curto	= 400,0 + 0,0075 P - 1,245 T - 3,06 t + 0,001123 T*T - 0,00160 P*t + 0,00844 T*t	1,11	89,70%	81,98%	49,97%
0,7	1000	Curto	= 487,5 + 0,0072 P - 1,546 T - 3,75 t + 0,001410 T*T - 0,00168 P*t + 0,00993 T*t	1,237	90,06%	82,60%	51,96%
0,7	50	Longo	= 1,65 + 0,00695 P - 0,002691 T - 0,00349 t - 0,000005 P*P	0,04	91,65%	88,31%	82,80%
0,7	60	Longo	= 6,168 - 0,001060 P - 0,003757 T - 0,00212 t	0,062	89,83%	87,05%	81,28%
0,7	100	Longo	= 10,032 - 0,001566 P - 0,005728 T - 0,01033 t	0,069	94,27%	92,71%	89,99%
0,7	200	Longo	= 20,461 - 0,003497 P - 0,01073 T - 0,0251 t	0,15	93,26%	91,42%	87,72%
0,7	300	Longo	= 29,48 - 0,004815 P - 0,01337 T - 0,0273 t	0,245	89,39%	86,49%	80,68%
0,7	400	Longo	= 66,0 - 0,00689 P - 0,1222 T - 0,0368 t + 0,000106 T*T	0,327	89,94%	85,91%	79,35%
0,7	500	Longo	= 92,4 - 0,00820 P - 0,1934 T - 0,0284 t + 0,000176 T*T	0,423	87,58%	82,61%	74,33%

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,7	600	Longo	= 129,3 - 0,01004 P - 0,304 T - 0,0396 t + 0,000286 T*t	0,529	85,66%	79,93%	70,54%
0,7	700	Longo	= 170,2 - 0,01212 P - 0,429 T - 0,0437 t + 0,000410 T*t	0,662	83,99%	77,58%	65,79%
0,7	800	Longo	= 216,3 - 0,01434 P - 0,577 T - 0,0321 t + 0,000561 T*t	0,853	80,01%	72,02%	56,16%
0,7	900	Longo	= 260,6 - 0,01710 P - 0,712 T - 0,0566 t + 0,000697 T*t	0,93	82,23%	75,13%	62,93%
0,7	1000	Longo	= 311,3 - 0,01867 P - 0,880 T - 0,0555 t + 0,000869 T*t	1,05	81,53%	74,15%	61,04%
0,8	50	Curto	= 8,89 - 0,000177 P - 0,01188 T - 0,0436 t + 0,000003 T*t - 0,000107 P*t + 0,000237 T*t	0,043	98,57%	97,50%	93,82%
0,8	60	Curto	= 14,25 - 0,000134 P - 0,02908 T - 0,0674 t + 0,000019 T*t - 0,000114 P*t + 0,000289 T*t	0,037	99,19%	98,58%	97,42%
0,8	100	Curto	= 24,02 + 0,000097 P - 0,0496 T - 0,1456 t + 0,000032 T*t - 0,000208 P*t + 0,000581 T*t	0,078	98,63%	97,61%	94,06%
0,8	200	Curto	= 54,04 + 0,00291 P - 0,1301 T - 0,153 t + 0,000095 T*t - 0,000655 P*t + 0,001262 T*t	0,139	98,82%	97,93%	95,59%
0,8	300	Curto	= 96,1 + 0,00343 P - 0,2515 T - 0,472 t + 0,000200 T*t - 0,000871 P*t + 0,002219 T*t	0,222	98,30%	97,02%	92,48%
0,8	400	Curto	= 142,0 + 0,00416 P - 0,3862 T - 0,821 t + 0,000318 T*t - 0,001123 P*t + 0,003294 T*t	0,322	97,73%	96,03%	89,65%
0,8	500	Curto	= 198,2 + 0,00668 P - 0,5657 T - 1,171 t + 0,000481 T*t - 0,001533 P*t + 0,004640 T*t	0,429	97,14%	95,00%	87,87%
0,8	600	Curto	= 266,8 + 0,00812 P - 0,792 T - 1,613 t + 0,000692 T*t - 0,001789 P*t + 0,00592 T*t	0,659	94,93%	91,12%	76,24%
0,8	700	Curto	= 337,8 + 0,00914 P - 1,025 T - 2,21 t + 0,000910 T*t - 0,002014 P*t + 0,00747 T*t	0,86	93,21%	88,11%	66,74%
0,8	800	Curto	= 411,9 + 0,0116 P - 1,271 T - 2,92 t + 0,001138 T*t - 0,00235 P*t + 0,00942 T*t	1,077	91,56%	85,24%	58,10%
0,8	900	Curto	= 514,8 + 0,0134 P - 1,630 T - 3,73 t + 0,001480 T*t - 0,00265 P*t + 0,01153 T*t	1,266	91,07%	84,36%	57,96%
0,8	1000	Curto	= 620,5 + 0,0168 P - 2,008 T - 4,38 t + 0,001843 T*t - 0,00313 P*t + 0,01365 T*t	1,515	90,20%	82,84%	52,59%
0,8	50	Longo	= 6,089 - 0,001062 P - 0,003358 T - 0,00219 t	0,062	88,14%	84,90%	77,79%
0,8	60	Longo	= 7,659 - 0,001174 P - 0,004825 T - 0,00419 t	0,072	91,04%	88,60%	83,56%
0,8	100	Longo	= 6,90 + 0,01116 P - 0,006571 T - 0,01148 t - 0,000008 P*P	0,076	95,22%	93,31%	89,61%
0,8	200	Longo	= 15,30 + 0,0193 P - 0,01261 T - 0,0217 t - 0,000014 P*P	0,176	93,33%	90,66%	85,79%
0,8	300	Longo	= 36,43 - 0,00599 P - 0,01603 T - 0,0273 t	0,287	90,03%	87,31%	81,33%
0,8	400	Longo	= 48,20 - 0,00793 P - 0,01872 T - 0,0346 t	0,444	84,97%	80,87%	72,42%
0,8	500	Longo	= 98,9 - 0,01107 P - 0,174 T - 0,0439 t + 0,000154 T*t	0,528	86,99%	81,79%	73,42%
0,8	600	Longo	= 147,0 - 0,01263 P - 0,322 T - 0,0382 t + 0,000302 T*t	0,679	83,65%	77,10%	66,32%
0,8	700	Longo	= 193,1 - 0,01504 P - 0,460 T - 0,0439 t + 0,000440 T*t	0,829	81,73%	74,42%	62,11%
0,8	800	Longo	= 249,0 - 0,01771 P - 0,637 T - 0,0367 t + 0,000620 T*t	0,892	83,57%	77,00%	62,87%
0,8	900	Longo	= 294,1 - 0,02107 P - 0,767 T - 0,0431 t + 0,000753 T*t	1,208	78,38%	69,73%	55,35%
0,8	1000	Longo	= 349,4 - 0,02273 P - 0,946 T - 0,0233 t + 0,000938 T*t	1,12	83,46%	76,84%	63,10%
0,9	50	Curto	= 12,67 + 0,000544 P - 0,0237 T - 0,0633 t + 0,000012 T*t - 0,000175 P*t + 0,000371 T*t	0,061	97,94%	96,40%	92,87%
0,9	60	Curto	= 12,99 - 0,000764 P - 0,0171 T - 0,0671 t + 0,000006 T*t - 0,000082 P*t + 0,000235 T*t	0,072	97,95%	96,40%	91,91%
0,9	100	Curto	= 29,73 + 0,001788 P - 0,0690 T - 0,044 t + 0,000049 T*t - 0,000385 P*t + 0,000636 T*t	0,09	98,67%	97,68%	94,69%
0,9	200	Curto	= 65,6 + 0,00287 P - 0,1564 T - 0,351 t + 0,000115 T*t - 0,000696 P*t + 0,001694 T*t	0,203	97,97%	96,45%	91,74%

B_{\max} [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,9	300	Curto	= 121,8 + 0,00387 P - 0,3272 T - 0,560 t + 0,000267 T*T - 0,001026 P*t + 0,002615 T*t	0,263	98,26%	96,96%	92,72%
0,9	400	Curto	= 181,3 + 0,00664 P - 0,5131 T - 0,772 t + 0,000435 T*T - 0,001527 P*t + 0,003793 T*t	0,367	97,90%	96,32%	91,01%
0,9	500	Curto	= 251,2 + 0,00835 P - 0,735 T - 1,335 t + 0,000639 T*T - 0,001845 P*t + 0,00540 T*t	0,567	96,28%	93,49%	84,84%
0,9	600	Curto	= 338,2 + 0,00984 P - 1,026 T - 1,801 t + 0,000914 T*T - 0,002153 P*t + 0,00682 T*t	0,739	95,28%	91,74%	79,08%
0,9	700	Curto	= 437,3 + 0,0108 P - 1,360 T - 2,57 t + 0,001231 T*T - 0,00234 P*t + 0,00865 T*t	1	93,34%	88,35%	69,21%
0,9	800	Curto	= 531,5 + 0,0165 P - 1,686 T - 3,16 t + 0,001538 T*T - 0,00307 P*t + 0,01097 T*t	1,13	93,40%	88,44%	70,95%
0,9	900	Curto	= 664,7 + 0,0155 P - 2,148 T - 4,37 t + 0,001983 T*T - 0,00314 P*t + 0,01350 T*t	1,529	91,01%	84,27%	57,69%
0,9	1000	Curto	= 776,7 + 0,0197 P - 2,545 T - 5,04 t + 0,002368 T*T - 0,00356 P*t + 0,01558 T*t	1,687	91,21%	84,61%	59,72%
0,9	50	Longo	= 7,104 - 0,001079 P - 0,003778 T - 0,00511 t	0,059	91,05%	88,60%	85,62%
0,9	60	Longo	= 8,314 - 0,001166 P - 0,004314 T - 0,00598 t	0,081	87,13%	83,62%	78,37%
0,9	100	Longo	= 15,138 - 0,002699 P - 0,008064 T - 0,01563 t	0,105	94,13%	92,53%	89,57%
0,9	200	Longo	= 29,59 - 0,005190 P - 0,01384 T - 0,0271 t	0,232	91,19%	88,79%	84,47%
0,9	300	Longo	= 43,16 - 0,00700 P - 0,01758 T - 0,0332 t	0,357	88,03%	84,76%	78,59%
0,9	400	Longo	= 57,51 - 0,01022 P - 0,01948 T - 0,0356 t	0,486	86,19%	82,42%	75,78%
0,9	500	Longo	= 137,4 - 0,01261 P - 0,288 T - 0,0412 t + 0,000268 T*T	0,631	84,77%	78,67%	69,52%
0,9	600	Longo	= 183,5 - 0,01591 P - 0,415 T - 0,0333 t + 0,000396 T*T	0,758	84,51%	78,31%	69,33%
0,9	700	Longo	= 249,9 - 0,01861 P - 0,625 T - 0,0469 t + 0,000608 T*T	0,933	82,88%	76,03%	65,95%
0,9	800	Longo	= 301,9 - 0,02310 P - 0,773 T - 0,0285 t + 0,000762 T*T	1,181	80,91%	73,28%	60,66%
0,9	900	Longo	= 403,7 - 0,02656 P - 1,083 T - 2,08 t + 0,001038 T*T + 0,00408 T*t	1,253	85,96%	78,16%	64,62%
0,9	1000	Longo	= 468,9 - 0,02887 P - 1,285 T - 2,33 t + 0,001243 T*T + 0,00457 T*t	1,363	86,64%	79,22%	66,53%
1,0	50	Curto	= 20,23 - 0,000046 P - 0,0487 T - 0,0589 t + 0,000037 T*T - 0,000147 P*t + 0,000318 T*t	0,077	97,38%	95,41%	88,14%
1,0	60	Curto	= 23,73 - 0,001177 P - 0,0517 T - 0,169 t + 0,000037 T*T - 0,000077 P*t + 0,000426 T*t	0,088	97,78%	96,12%	92,64%
1,0	100	Curto	= 32,26 + 0,00349 P - 0,0734 T + 0,028 t + 0,000049 T*T - 0,000591 P*t + 0,000810 T*t	0,104	98,74%	97,80%	94,80%
1,0	200	Curto	= 80,42 + 0,00195 P - 0,1930 T - 0,391 t + 0,000145 T*T - 0,000701 P*t + 0,001789 T*t	0,143	99,28%	98,74%	96,84%
1,0	300	Curto	= 142,4 + 0,00328 P - 0,3754 T - 0,722 t + 0,000306 T*T - 0,001140 P*t + 0,003092 T*t	0,314	98,19%	96,83%	92,16%
1,0	400	Curto	= 220,7 + 0,00567 P - 0,6235 T - 1,196 t + 0,000532 T*T - 0,001628 P*t + 0,004780 T*t	0,447	97,61%	95,82%	90,09%
1,0	500	Curto	= 310,9 + 0,00830 P - 0,919 T - 1,693 t + 0,000808 T*T - 0,002044 P*t + 0,00641 T*t	0,675	96,08%	93,14%	81,97%
1,0	600	Curto	= 421,2 + 0,01032 P - 1,294 T - 2,29 t + 0,001164 T*T - 0,002464 P*t + 0,00827 T*t	0,935	94,44%	90,28%	75,06%
1,0	700	Curto	= 540,7 + 0,0133 P - 1,702 T - 3,12 t + 0,001551 T*T - 0,00290 P*t + 0,01058 T*t	1,196	93,19%	88,08%	68,24%
1,0	800	Curto	= 670,2 + 0,0185 P - 2,156 T - 3,99 t + 0,001984 T*T - 0,00359 P*t + 0,01346 T*t	1,407	92,86%	87,51%	66,00%
1,0	900	Curto	= 798,5 + 0,0184 P - 2,590 T - 5,32 t + 0,002402 T*T - 0,00371 P*t + 0,01632 T*t	1,858	90,38%	83,16%	54,12%
1,0	1000	Curto	= 972 + 0,0209 P - 3,213 T - 6,42 t + 0,003009 T*T - 0,00399 P*t + 0,01898 T*t	2,294	89,34%	81,35%	47,63%
1,0	50	Longo	= 8,796 - 0,001204 P - 0,005304 T - 0,00525 t	0,069	92,94%	91,01%	87,91%
1,0	60	Longo	= 10,529 - 0,001536 P - 0,005934 T - 0,01495 t	0,09	91,27%	88,88%	84,31%
1,0	100	Longo	= 17,257 - 0,002448 P - 0,009417 T - 0,01313 t	0,128	92,65%	90,65%	86,71%
1,0	200	Longo	= 33,91 - 0,00571 P - 0,01442 T - 0,0326 t	0,288	88,45%	85,30%	79,00%

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
1,0	300	Longo	= 79,7 - 0,00879 P - 0,1337 T - 0,0474 t + 0,000114 T*t	0,438	88,40%	83,76%	76,21%
1,0	400	Longo	= 105,2 - 0,01279 P - 0,171 T - 0,0459 t + 0,000151 T*t	0,553	87,91%	83,08%	76,12%
1,0	500	Longo	= 164,5 - 0,01535 P - 0,346 T - 0,0382 t + 0,000325 T*t	0,739	84,61%	78,45%	69,16%
1,0	600	Longo	= 227,3 - 0,01966 P - 0,529 T - 0,0398 t + 0,000510 T*t	0,932	83,56%	76,98%	67,15%
1,0	700	Longo	= 303,6 - 0,02318 P - 0,767 T - 0,0462 t + 0,000752 T*t	1,166	81,78%	74,50%	62,70%
1,0	800	Longo	= 369,9 - 0,02816 P - 0,964 T - 0,028 t + 0,000957 T*t	1,42	80,98%	73,38%	60,46%
1,0	900	Longo	= 504,6 - 0,03205 P - 1,385 T - 2,53 t + 0,001338 T*t + 0,00494 T*t	1,578	85,39%	77,28%	63,08%
1,0	1000	Longo	= 584,8 - 0,03731 P - 1,619 T - 3,14 t + 0,001569 T*t + 0,00613 T*t	1,635	88,30%	81,80%	71,24%
1,1	50	Curto	= 21,47 + 0,001409 P - 0,0531 T + 0,0045 t + 0,000040 T*t - 0,000264 P*t + 0,000379 T*t	0,076	97,92%	96,35%	90,57%
1,1	60	Curto	= 23,92 + 0,00027 P - 0,0502 T - 0,110 t + 0,000033 T*t - 0,000259 P*t + 0,000588 T*t	0,099	97,74%	96,04%	91,88%
1,1	100	Curto	= 37,1 + 0,00137 P - 0,0752 T - 0,236 t + 0,000047 T*t - 0,000400 P*t + 0,001021 T*t	0,197	96,21%	93,37%	85,05%
1,1	200	Curto	= 92,2 + 0,00214 P - 0,2183 T - 0,536 t + 0,000164 T*t - 0,000839 P*t + 0,002258 T*t	0,237	98,40%	97,20%	93,62%
1,1	300	Curto	= 173,4 + 0,00632 P - 0,4762 T - 0,754 t + 0,000398 T*t - 0,001514 P*t + 0,003725 T*t	0,411	97,44%	95,53%	89,18%
1,1	400	Curto	= 251,8 + 0,00787 P - 0,7079 T - 1,388 t + 0,000603 T*t - 0,001996 P*t + 0,005723 T*t	0,463	97,94%	96,40%	91,26%
1,1	500	Curto	= 383,7 + 0,01057 P - 1,160 T - 2,00 t + 0,001034 T*t - 0,002452 P*t + 0,00766 T*t	0,802	95,71%	92,50%	81,10%
1,1	600	Curto	= 499,8 + 0,0134 P - 1,544 T - 2,89 t + 0,001395 T*t - 0,00296 P*t + 0,01022 T*t	1,065	94,29%	90,01%	74,19%
1,1	700	Curto	= 650,4 + 0,0176 P - 2,068 T - 3,76 t + 0,001895 T*t - 0,00364 P*t + 0,01304 T*t	1,38	93,19%	88,08%	68,86%
1,1	800	Curto	= 799,5 + 0,0235 P - 2,596 T - 4,83 t + 0,002404 T*t - 0,00419 P*t + 0,01612 T*t	1,822	90,91%	84,10%	60,01%
1,1	900	Curto	= 973 + 0,0219 P - 3,196 T - 6,20 t + 0,002990 T*t - 0,00430 P*t + 0,01903 T*t	2,416	88,57%	80,00%	43,76%
1,1	1000	Curto	= 1177 + 0,0276 P - 3,934 T - 7,43 t + 0,003706 T*t - 0,00494 P*t + 0,02253 T*t	2,735	89,55%	81,71%	45,57%
1,1	50	Longo	= 10,231 - 0,001447 P - 0,005776 T - 0,01823 t - 0,000032 T*t	0,091	90,82%	88,32%	84,00%
1,1	60	Longo	= 3,86 - 0,001991 P + 0,0259 T - 0,00392 t - 0,000032 T*t	0,096	91,51%	88,11%	81,84%
1,1	100	Longo	= 19,799 - 0,003323 P - 0,00939 T - 0,0167 t - 0,000032 T*t	0,159	90,65%	88,10%	83,01%
1,1	200	Longo	= 39,40 - 0,006463 P - 0,01664 T - 0,0251 t - 0,000032 T*t	0,259	92,43%	90,37%	87,79%
1,1	300	Longo	= 59,16 - 0,01052 P - 0,02058 T - 0,0376 t - 0,000032 T*t	0,474	87,71%	84,36%	78,51%
1,1	400	Longo	= 77,76 - 0,01498 P - 0,01977 T - 0,0517 t - 0,000032 T*t	0,693	83,28%	78,72%	70,38%
1,1	500	Longo	= 187,4 - 0,01877 P - 0,384 T - 0,0441 t + 0,000365 T*t	0,83	84,97%	78,95%	70,48%
1,1	600	Longo	= 267,2 - 0,02289 P - 0,628 T - 0,0478 t + 0,000613 T*t	1,141	80,94%	73,32%	61,52%
1,1	700	Longo	= 357,9 - 0,02824 P - 0,872 T - 2,01 t + 0,000826 T*t + 0,00394 T*t	1,201	86,72%	79,33%	68,54%
1,1	800	Longo	= 458,2 - 0,03305 P - 1,187 T - 2,49 t + 0,001141 T*t + 0,00494 T*t	1,563	84,97%	76,62%	60,07%
1,1	900	Longo	= 587,7 - 0,03896 P - 1,605 T - 3,21 t + 0,001555 T*t + 0,00634 T*t	1,814	86,63%	79,20%	66,84%
1,1	1000	Longo	= 671 - 0,04341 P - 1,845 T - 3,88 t + 0,001795 T*t + 0,00768 T*t	1,97	87,94%	81,24%	71,28%
1,2	50	Curto	= 20,39 + 0,001174 P - 0,0418 T - 0,0010 t + 0,000026 T*t - 0,000334 P*t + 0,000487 T*t	0,052	99,29%	98,76%	96,82%
1,2	60	Curto	= 19,44 + 0,00055 P - 0,0253 T - 0,240 t + 0,000006 T*t - 0,000241 P*t + 0,000777 T*t	0,141	95,86%	92,75%	83,86%

B_{\max} [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
1,2	100	Curto	= 44,66 + 0,00174 P - 0,0954 T - 0,181 t + 0,000064 T ² T - 0,000581 P*t + 0,001207 T*t	0,125	98,81%	97,91%	94,39%
1,2	200	Curto	= 105,9 + 0,00316 P - 0,2551 T - 0,462 t + 0,000196 T ² T - 0,001074 P*t + 0,002474 T*t	0,256	98,46%	97,31%	93,44%
1,2	300	Curto	= 207,1 + 0,00690 P - 0,579 T - 0,888 t + 0,000492 T ² T - 0,001746 P*t + 0,004355 T*t	0,482	97,11%	94,94%	88,27%
1,2	400	Curto	= 304,8 + 0,00980 P - 0,881 T - 1,469 t + 0,000767 T ² T - 0,002346 P*t + 0,00643 T*t	0,592	97,23%	95,15%	87,19%
1,2	500	Curto	= 441,3 + 0,01239 P - 1,334 T - 2,49 t + 0,001192 T ² T - 0,002872 P*t + 0,00927 T*t	0,915	95,38%	91,91%	79,72%
1,2	600	Curto	= 594,1 + 0,0146 P - 1,852 T - 3,48 t + 0,001687 T ² T - 0,00348 P*t + 0,01219 T*t	1,369	92,74%	87,29%	69,37%
1,2	700	Curto	= 771,4 + 0,0218 P - 2,481 T - 4,37 t + 0,002292 T ² T - 0,00430 P*t + 0,01535 T*t	1,626	92,62%	87,08%	67,58%
1,2	800	Curto	= 939 + 0,0216 P - 3,043 T - 6,35 t + 0,002830 T ² T - 0,00427 P*t + 0,01923 T*t	2,21	89,86%	82,25%	52,37%
1,2	900	Curto	= 1147 + 0,0173 P - 3,758 T - 8,29 t + 0,003526 T ² T - 0,00419 P*t + 0,02302 T*t	2,792	88,75%	80,32%	44,76%
1,2	1000	Curto	= 1407 + 0,0232 P - 4,712 T - 9,16 t + 0,004465 T ² T - 0,00533 P*t + 0,02666 T*t	3,555	88,17%	79,30%	43,84%
1,2	50	Longo	= 11,147 - 0,001409 P - 0,005901 T - 0,01158 t	0,112	86,44%	82,75%	75,76%
1,2	60	Longo	= 14,029 - 0,002275 P - 0,007451 T - 0,01018 t	0,123	90,22%	87,55%	82,56%
1,2	100	Longo	= 23,229 - 0,003736 P - 0,01172 T - 0,0143 t	0,173	92,18%	90,05%	85,80%
1,2	200	Longo	= 44,96 - 0,00794 P - 0,01687 T - 0,0355 t	0,341	89,59%	86,75%	81,65%
1,2	300	Longo	= 66,48 - 0,01259 P - 0,01872 T - 0,0409 t	0,518	87,15%	83,65%	78,17%
1,2	400	Longo	= 151,8 - 0,01796 P - 0,271 T - 0,0653 t + 0,000252 T ² T	0,735	86,73%	81,42%	73,79%
1,2	500	Longo	= 209,0 - 0,02272 P - 0,415 T - 0,0466 t + 0,000401 T ² T	0,924	85,26%	79,36%	71,83%
1,2	600	Longo	= 295,7 - 0,02720 P - 0,677 T - 0,0335 t + 0,000671 T ² T	1,304	80,60%	72,84%	61,04%
1,2	700	Longo	= 403,1 - 0,03372 P - 1,013 T - 0,031 t + 0,001015 T ² T	1,59	82,02%	74,82%	63,32%
1,2	800	Longo	= 510,7 - 0,03986 P - 1,352 T - 0,020 t + 0,001367 T ² T	1,905	82,86%	76,00%	64,84%
1,2	900	Longo	= 677 - 0,04781 P - 1,844 T - 3,62 t + 0,001805 T ² T + 0,00715 T*t	1,989	89,15%	83,12%	74,23%
1,2	1000	Longo	= 771 - 0,05197 P - 2,132 T - 3,92 t + 0,002107 T ² T + 0,00776 T*t	2,436	87,97%	81,28%	70,41%
1,3	50	Curto	= 27,65 - 0,00108 P - 0,0575 T - 0,280 t + 0,000040 T ² T - 0,000096 P*t + 0,000665 T*t	0,135	95,51%	92,14%	79,21%
1,3	60	Curto	= 33,65 - 0,00021 P - 0,0755 T - 0,230 t + 0,000056 T ² T - 0,000213 P*t + 0,000740 T*t	0,168	94,75%	90,81%	74,82%
1,3	100	Curto	= 55,2 + 0,00250 P - 0,1331 T - 0,058 t + 0,000103 T ² T - 0,000576 P*t + 0,000942 T*t	0,22	96,62%	94,08%	84,46%
1,3	200	Curto	= 133,5 + 0,00366 P - 0,3458 T - 0,484 t + 0,000282 T ² T - 0,001214 P*t + 0,002745 T*t	0,259	98,66%	97,65%	93,94%
1,3	300	Curto	= 242,3 + 0,00771 P - 0,688 T - 1,094 t + 0,000594 T ² T - 0,001912 P*t + 0,00502 T*t	0,54	96,79%	94,37%	86,03%
1,3	400	Curto	= 346,2 + 0,01087 P - 1,002 T - 2,003 t + 0,000876 T ² T - 0,002487 P*t + 0,00770 T*t	0,67	96,70%	94,23%	85,08%
1,3	500	Curto	= 509,4 + 0,0108 P - 1,548 T - 2,81 t + 0,001400 T ² T - 0,00300 P*t + 0,01013 T*t	1,163	93,58%	88,76%	70,73%
1,3	600	Curto	= 697,4 + 0,0134 P - 2,187 T - 4,38 t + 0,002009 T ² T - 0,00351 P*t + 0,01409 T*t	1,517	92,47%	86,83%	67,62%
1,3	700	Curto	= 861 + 0,0167 P - 2,729 T - 6,00 t + 0,002522 T ² T - 0,00421 P*t + 0,01840 T*t	1,894	91,75%	85,57%	61,60%
1,3	800	Curto	= 1093 + 0,0289 P - 3,580 T - 7,23 t + 0,003350 T ² T - 0,00511 P*t + 0,02235 T*t	2,591	89,48%	81,59%	50,68%
1,3	900	Curto	= 1365 + 0,0315 P - 4,560 T - 8,56 t + 0,004315 T ² T - 0,00588 P*t + 0,02633 T*t	3,177	89,80%	82,15%	49,10%
1,3	1000	Curto	= 1648 + 0,0317 P - 5,559 T - 10,87 t + 0,005289 T ² T - 0,00674 P*t + 0,03228 T*t	3,75	90,86%	84,00%	63,51%

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
1,3	50	Longo	= 12,395 - 0,001842 P - 0,005607 T - 0,01709 t	0,115	86,87%	83,29%	76,07%
1,3	60	Longo	= 15,120 - 0,003370 P - 0,00560 T - 0,0093 t	0,153	85,82%	81,95%	74,84%
1,3	100	Longo	= 24,513 - 0,004101 P - 0,00945 T - 0,0181 t	0,214	86,35%	82,62%	73,92%
1,3	200	Longo	= 25,2 + 0,0520 P - 0,01602 T - 0,0360 t - 0,000038 P*P	0,33	91,27%	87,78%	83,19%
1,3	300	Longo	= 74,23 - 0,01355 P - 0,01876 T - 0,0462 t	0,671	81,74%	76,76%	66,54%
1,3	400	Longo	= 164,7 - 0,02009 P - 0,282 T - 0,0637 t + 0,000268 T*T	0,829	84,90%	78,86%	70,48%
1,3	500	Longo	= 250,9 - 0,02497 P - 0,533 T - 0,0459 t + 0,000527 T*T	1,133	81,79%	74,51%	63,82%
1,3	600	Longo	= 354,0 - 0,03162 P - 0,800 T - 2,18 t + 0,000762 T*T + 0,00429 T*t	1,272	87,14%	79,99%	70,75%
1,3	700	Longo	= 471,6 - 0,03927 P - 1,161 T - 2,43 t + 0,001132 T*T + 0,00481 T*t	1,574	88,18%	81,62%	71,08%
1,3	800	Longo	= 623 - 0,04681 P - 1,640 T - 3,41 t + 0,001606 T*T + 0,00683 T*t	1,998	88,24%	81,71%	68,77%
1,3	900	Longo	= 743 - 0,05574 P - 2,001 T - 3,84 t + 0,001982 T*T + 0,00760 T*t	2,447	88,65%	82,35%	72,36%
1,3	1000	Longo	= 901 - 0,05836 P - 2,519 T - 5,17 t + 0,002503 T*T + 0,01038 T*t	2,671	90,35%	84,99%	78,29%
1,4	50	Curto	= 35,69 + 0,00039 P - 0,0901 T - 0,193 t + 0,000072 T*T - 0,000214 P*t + 0,000674 T*t	0,155	94,58%	90,52%	75,54%
1,4	60	Curto	= 22,57 + 0,00607 P - 0,0482 T + 0,414 t + 0,000029 T*T - 0,000812 P*t + 0,000437 T*t	0,143	97,02%	94,79%	87,82%
1,4	100	Curto	= 69,1 - 0,00299 P - 0,1639 T - 0,279 t + 0,000132 T*T - 0,000291 P*t + 0,001005 T*t	0,276	95,62%	92,33%	78,99%
1,4	200	Curto	= 144,5 + 0,01057 P - 0,3938 T - 0,072 t + 0,000328 T*T - 0,001748 P*t + 0,002804 T*t	0,306	98,21%	96,86%	91,76%
1,4	300	Curto	= 254,0 + 0,00540 P - 0,692 T - 1,461 t + 0,000591 T*T - 0,001819 P*t + 0,00557 T*t	0,61	96,27%	93,47%	84,09%
1,4	400	Curto	= 395,9 + 0,01539 P - 1,174 T - 1,709 t + 0,001045 T*T - 0,003055 P*t + 0,00806 T*t	0,746	96,40%	93,69%	82,94%
1,4	500	Curto	= 567,9 + 0,0133 P - 1,730 T - 3,05 t + 0,001576 T*T - 0,00335 P*t + 0,01112 T*t	1,403	91,75%	85,56%	63,21%
1,4	600	Curto	= 796,5 + 0,0236 P - 2,545 T - 4,25 t + 0,002358 T*T - 0,00454 P*t + 0,01553 T*t	1,657	92,52%	86,91%	65,85%
1,4	700	Curto	= 995 + 0,0154 P - 3,183 T - 6,60 t + 0,002974 T*T - 0,00403 P*t + 0,01940 T*t	2,457	88,56%	79,98%	41,87%
1,4	800	Curto	= 1264 + 0,0254 P - 4,155 T - 8,15 t + 0,003922 T*T - 0,00523 P*t + 0,02443 T*t	3,397	86,64%	76,62%	32,96%
1,4	900	Curto	= 1596 + 0,0194 P - 5,310 T - 10,98 t + 0,005046 T*T - 0,00546 P*t + 0,03035 T*t	3,584	90,61%	83,56%	55,75%
1,4	1000	Curto	= 1938 + 0,0317 P - 6,561 T - 13,73 t + 0,006257 T*T - 0,00708 P*t + 0,03868 T*t	4,225	91,79%	85,64%	62,49%
1,4	50	Longo	= 2,03 - 0,002113 P + 0,0399 T - 0,01112 t - 0,000045 T*T	0,098	90,79%	87,11%	82,93%
1,4	60	Longo	= -14,21 + 0,05164 P + 0,02478 T - 0,02379 t - 0,000022 P*P - 0,000037 P*T	0,09	92,73%	88,70%	84,52%
1,4	100	Longo	= -2,3 + 0,0476 P + 0,0194 T - 0,0035 t - 0,000021 P*P - 0,000034 P*T	0,195	87,64%	80,78%	71,79%
1,4	200	Longo	= 51,54 - 0,00743 P - 0,01324 T - 0,0457 t	0,438	79,79%	74,27%	62,30%
1,4	300	Longo	= 78,61 - 0,01556 P - 0,01069 T - 0,0195 t	0,533	87,43%	84,01%	80,04%
1,4	400	Longo	= 106,45 - 0,02254 P - 0,00755 T - 0,0371 t	0,945	81,06%	75,90%	67,33%
1,4	500	Longo	= 263,7 - 0,02781 P - 0,531 T - 0,0042 t + 0,000532 T*T	1,207	82,46%	75,45%	65,39%
1,4	600	Longo	= 389,0 - 0,03409 P - 0,925 T - 0,026 t + 0,000943 T*T	1,6	82,52%	75,53%	64,69%
1,4	700	Longo	= 510,4 - 0,04447 P - 1,283 T - 0,009 t + 0,001317 T*T	1,923	85,77%	80,08%	71,07%
1,4	800	Longo	= 659 - 0,05374 P - 1,684 T - 3,75 t + 0,001668 T*T + 0,00748 T*t	2,296	88,89%	82,72%	72,61%
1,4	900	Longo	= 882 - 0,0611 P - 2,439 T - 4,78 t + 0,002431 T*T + 0,00958 T*t	2,866	89,27%	83,31%	72,19%

B_{\max} [T]	f [Hz]	Tratamento	Equação (P_{total}) [W/kg]	S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
1,4	1000	Longo	= 1007 - 0,0659 P - 2,814 T - 5,87 t + 0,002822 T*t + 0,01190 T*t	3,404	90,56%	84,67%	73,24%
1,5	50	Curto	= 40,00 + 0,00118 P - 0,1113 T + 0,062 t + 0,000097 T*t - 0,000284 P*t + 0,000323 T*t	0,174	92,89%	87,56%	68,53%
1,5	60	Curto	= 18,4 + 0,00476 P - 0,0184 T + 0,126 t - 0,000004 T*t - 0,000713 P*t + 0,000821 T*t	0,207	94,26%	89,95%	83,01%
1,5	100	Curto	= 72,5 + 0,00511 P - 0,1866 T - 0,299 t + 0,000147 T*t - 0,000804 P*t + 0,001765 T*t	0,305	94,41%	90,21%	81,56%
1,5	200	Curto	= 158,8 + 0,00752 P - 0,425 T - 0,165 t + 0,000360 T*t - 0,001659 P*t + 0,002786 T*t	0,498	95,62%	92,34%	81,43%
1,5	300	Curto	= 305,5 + 0,01678 P - 0,913 T - 0,518 t + 0,000815 T*t - 0,002867 P*t + 0,00549 T*t	0,591	96,70%	94,22%	86,93%
1,5	400	Curto	= 440,0 + 0,01702 P - 1,315 T - 1,81 t + 0,001184 T*t - 0,003240 P*t + 0,00861 T*t	0,917	94,80%	90,91%	74,86%
1,5	500	Curto	= 653,2 + 0,0295 P - 2,065 T - 2,51 t + 0,001902 T*t - 0,00501 P*t + 0,01276 T*t	1,376	93,34%	88,35%	68,31%
1,5	600	Curto	= 851 + 0,0275 P - 2,698 T - 5,03 t + 0,002502 T*t - 0,00518 P*t + 0,01805 T*t	2,027	90,45%	83,29%	55,75%
1,5	700	Curto	= 1110 + 0,0304 P - 3,606 T - 6,40 t + 0,003394 T*t - 0,00547 P*t + 0,02138 T*t	2,852	87,65%	78,39%	34,91%
1,5	800	Curto	= 1336 + 0,0204 P - 4,306 T - 10,14 t + 0,004055 T*t - 0,00543 P*t + 0,02878 T*t	3,562	87,95%	78,91%	39,23%
1,5	900	Curto	= 1822 + 0,0399 P - 6,153 T - 11,43 t + 0,005873 T*t - 0,00801 P*t + 0,03543 T*t	4,433	90,08%	82,63%	57,37%
1,5	1000	Curto	= 2232 + 0,0555 P - 7,68 T - 13,44 t + 0,00738 T*t - 0,00994 P*t + 0,0429 T*t	5,117	91,62%	85,33%	61,07%
1,5	50	Longo	= 14,435 - 0,002872 P - 0,00468 T + 0,0037 t	0,149	81,95%	77,03%	64,94%
1,5	60	Longo	= 15,89 - 0,000487 P - 0,00722 T - 0,0181 t	0,251	61,88%	51,49%	28,43%
1,5	100	Longo	= 24,54 - 0,00189 P - 0,00890 T + 0,316 t - 0,01498 t*t	0,324	70,00%	58,00%	23,76%
1,5	200	Longo	= 20,6 + 0,0351 P + 0,0561 T - 0,0329 t - 0,000084 P*t	0,431	80,35%	72,49%	60,35%
1,5	300	Longo	= 83,97 - 0,01727 P - 0,00463 T - 0,0111 t	0,616	85,36%	81,37%	75,44%
1,5	400	Longo	= 237,6 - 0,02067 P - 0,508 T - 0,0406 t + 0,000507 T*t	0,985	80,70%	72,98%	60,79%
1,5	500	Longo	= 329,8 - 0,03163 P - 0,702 T - 1,97 t + 0,000676 T*t + 0,00390 T*t	1,231	87,77%	80,98%	69,94%
1,5	600	Longo	= 471,5 - 0,03654 P - 1,198 T - 0,047 t + 0,001236 T*t	1,811	83,97%	77,56%	66,83%
1,5	700	Longo	= 651 - 0,04727 P - 1,767 T - 0,046 t + 0,001815 T*t	2,361	84,44%	78,21%	66,83%
1,5	800	Longo	= 721 - 0,0613 P - 1,904 T - 0,007 t + 0,001989 T*t	2,93	86,22%	80,71%	72,39%
1,5	900	Longo	= 980 - 0,0666 P - 2,829 T - 0,009 t + 0,002960 T*t	3,764	86,46%	81,04%	71,07%
1,5	1000	Longo	= 1086 - 0,0774 P - 3,117 T + 0,121 t + 0,003286 T*t	4,284	87,72%	82,81%	73,57%

APÊNDICE B – Resultados Otimizados para Perdas Magnéticas

B _{máx} [T]	f [Hz]	Tratamento	Pressão de Compactação [MPa]	Temperatura Máxima [°C]	Tempo de Patamar [minutos]	IP 95% [W/kg]
0,1	50	Curto	900	550	5	0,06226 - 0,08991
0,1	60	Curto	900	550	15	0,056 - 0,11017
0,1	100	Curto	900	550	15	0,14342 - 0,17394
0,1	200	Curto	900	550	15	0,30764 - 0,359
0,1	300	Curto	900	550	15	0,50903 - 0,53936
0,1	400	Curto	900	534	15	0,68155 - 0,74475
0,1	500	Curto	900	533	15	0,8848 - 0,94018
0,1	600	Curto	900	523	15	1,0857 - 1,1836
0,1	700	Curto	900	517	15	1,3025 - 1,392
0,1	800	Curto	900	514	15	1,4977 - 1,6301
0,1	900	Curto	900	510	15	1,7193 - 1,8692
0,1	1000	Curto	900	509	15	1,9302 - 2,1251
0,1	50	Longo	700	550	5	0,06548 - 0,08878
0,1	60	Longo	900	550	15	0,0862 - 0,10066
0,1	100	Longo	900	550	15	0,14479 - 0,17939
0,1	200	Longo	900	550	15	0,31945 - 0,35823
0,1	300	Longo	900	550	15	0,50169 - 0,53961
0,1	400	Longo	900	550	15	0,68981 - 0,7483
0,1	500	Longo	900	547	15	0,8822 - 0,9647
0,1	600	Longo	900	539	15	1,0844 - 1,16793
0,1	700	Longo	900	535	15	1,2964 - 1,3823
0,1	800	Longo	900	527	15	1,5068 - 1,6218
0,1	900	Longo	900	522	15	1,7346 - 1,8647
0,1	1000	Longo	900	526	15	1,9488 - 2,0698
0,2	50	Curto	900	550	15	0,27092 - 0,30909
0,2	60	Curto	900	550	15	0,2968 - 0,3726
0,2	100	Curto	900	550	15	0,5487 - 0,6171
0,2	200	Curto	900	550	15	1,1586 - 1,2443
0,2	300	Curto	900	550	15	1,8284 - 1,9579
0,2	400	Curto	900	550	15	2,5209 - 2,6819
0,2	500	Curto	900	544	15	3,2617 - 3,4678
0,2	600	Curto	900	528	15	3,9818 - 4,3148
0,2	700	Curto	900	524	15	4,7609 - 5,1421
0,2	800	Curto	900	518	15	5,5015 - 6,0486
0,2	900	Curto	900	513	15	6,3355 - 6,8823
0,2	1000	Curto	900	509	15	7,1793 - 7,7971
0,2	50	Longo	900	550	15	0,27765 - 0,31695
0,2	60	Longo	900	550	15	0,32102 - 0,37663
0,2	100	Longo	900	550	15	0,57642 - 0,62505
0,2	200	Longo	900	550	15	1,1731 - 1,2945
0,2	300	Longo	900	550	15	1,8325 - 1,993
0,2	400	Longo	900	550	15	2,5321 - 2,7376
0,2	500	Longo	900	544	15	3,2416 - 3,5517
0,2	600	Longo	900	543	15	3,9844 - 4,3114
0,2	700	Longo	900	537	15	4,7615 - 5,1334
0,2	800	Longo	900	532	15	5,5372 - 5,9994
0,2	900	Longo	900	529	15	6,3939 - 6,9021
0,2	1000	Longo	900	524	15	7,2085 - 7,7574
0,3	50	Curto	900	550	15	0,5425 - 0,6121
0,3	60	Curto	900	550	15	0,6623 - 0,7408
0,3	100	Curto	900	550	15	1,1526 - 1,2336
0,3	200	Curto	900	550	15	2,3945 - 2,5473
0,3	300	Curto	900	550	15	3,7785 - 4,0291
0,3	400	Curto	900	550	15	5,2191 - 5,5658
0,3	500	Curto	900	545	15	6,7201 - 7,1836
0,3	600	Curto	900	530	15	8,3177 - 8,9624
0,3	700	Curto	900	523	15	9,959 - 10,807

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Pressão de Compactação [MPa]	Temperatura Máxima [°C]	Tempo de Patamar [minutos]	IP 95% [W/kg]
0,3	800	Curto	900	518	15	11,606 - 12,614
0,3	900	Curto	900	512	15	13,369 - 14,586
0,3	1000	Curto	900	508	15	15,066 - 16,435
0,3	50	Longo	900	550	15	0,57755 - 0,65049
0,3	60	Longo	900	550	15	0,69789 - 0,76932
0,3	100	Longo	900	550	15	1,2002 - 1,2945
0,3	200	Longo	900	550	15	2,475 - 2,7167
0,3	300	Longo	900	550	15	3,8365 - 4,1702
0,3	400	Longo	900	550	15	5,3025 - 5,7437
0,3	500	Longo	900	550	15	6,8449 - 7,4127
0,3	600	Longo	900	542	15	8,4464 - 9,1824
0,3	700	Longo	900	536	15	10,1178 - 10,9266
0,3	800	Longo	900	531	15	11,774 - 12,777
0,3	900	Longo	900	527	15	13,499 - 14,6
0,3	1000	Longo	900	523	15	15,308 - 16,506
0,4	50	Curto	900	550	15	0,9024 - 0,9983
0,4	60	Curto	900	550	15	1,0426 - 1,1838
0,4	100	Curto	900	550	15	1,8528 - 2,0387
0,4	200	Curto	900	550	15	3,9913 - 4,2133
0,4	300	Curto	900	550	15	6,2299 - 6,6611
0,4	400	Curto	900	547	15	8,588 - 9,28
0,4	500	Curto	900	538	15	11,188 - 11,996
0,4	600	Curto	900	526	15	13,795 - 14,919
0,4	700	Curto	900	520	15	16,526 - 17,982
0,4	800	Curto	900	512	15	19,245 - 21,05
0,4	900	Curto	900	508	15	22,144 - 24,183
0,4	1000	Curto	900	503	15	25,032 - 27,381
0,4	50	Longo	900	550	15	0,9631 - 1,0535
0,4	60	Longo	900	550	15	1,149 - 1,2739
0,4	100	Longo	900	550	15	1,9703 - 2,1343
0,4	200	Longo	900	550	15	4,0808 - 4,4517
0,4	300	Longo	900	550	15	6,4175 - 6,9763
0,4	400	Longo	900	550	15	8,866 - 9,641
0,4	500	Longo	900	550	15	11,45 - 12,45
0,4	600	Longo	900	543	15	14,179 - 15,334
0,4	700	Longo	900	535	15	16,947 - 18,289
0,4	800	Longo	900	531	15	19,781 - 21,328
0,4	900	Longo	900	524	15	22,672 - 24,545
0,4	1000	Longo	900	519	15	25,657 - 27,696
0,5	50	Curto	900	550	15	1,2961 - 1,4689
0,5	60	Curto	900	550	15	1,6109 - 1,7231
0,5	100	Curto	900	550	15	2,7489 - 2,9454
0,5	200	Curto	900	550	15	5,7614 - 6,2345
0,5	300	Curto	900	550	15	9,1053 - 9,7535
0,5	400	Curto	900	550	15	12,614 - 13,558
0,5	500	Curto	900	534	15	16,366 - 17,604
0,5	600	Curto	900	521	15	20,242 - 21,904
0,5	700	Curto	900	514	15	24,291 - 26,331
0,5	800	Curto	900	508	15	28,305 - 30,774
0,5	900	Curto	900	504	15	32,653 - 35,566
0,5	1000	Curto	900	501	15	36,842 - 40,491
0,5	50	Longo	900	550	15	1,4209 - 1,5525
0,5	60	Longo	900	550	15	1,6785 - 1,8767
0,5	100	Longo	900	550	15	2,8975 - 3,1262
0,5	200	Longo	900	550	15	6,0518 - 6,5278
0,5	300	Longo	900	550	15	9,458 - 10,245
0,5	400	Longo	900	550	15	13,039 - 14,144
0,5	500	Longo	900	550	15	16,949 - 18,31
0,5	600	Longo	900	542	15	20,974 - 22,635
0,5	700	Longo	900	532	15	25,114 - 27,061

B _{máx} [T]	f [Hz]	Tratamento	Pressão de Compactação [MPa]	Temperatura Máxima [°C]	Tempo de Patamar [minutos]	IP 95% [W/kg]
0,5	800	Longo	900	526	15	29,282 - 31,611
0,5	900	Longo	900	519	15	33,611 - 36,348
0,5	1000	Longo	900	516	15	38,096 - 41,066
0,6	50	Curto	900	550	15	1,7829 - 1,9171
0,6	60	Curto	900	550	15	2,093 - 2,3648
0,6	100	Curto	900	550	15	3,6895 - 3,9427
0,6	200	Curto	900	550	15	7,731 - 8,426
0,6	300	Curto	900	550	15	12,22 - 13,29
0,6	400	Curto	900	549	15	17,083 - 18,496
0,6	500	Curto	900	531	15	22,095 - 24,183
0,6	600	Curto	900	520	15	27,43 - 30,018
0,6	700	Curto	900	513	15	32,866 - 36,327
0,6	800	Curto	900	508	15	38,276 - 42,786
0,6	900	Curto	900	536	5	44,503 - 50,101
0,6	1000	Curto	900	531	5	50,523 - 56,823
0,6	50	Longo	900	550	15	1,9266 - 2,0766
0,6	60	Longo	900	550	15	2,304 - 2,5478
0,6	100	Longo	900	550	15	3,9783 - 4,2915
0,6	200	Longo	900	550	15	8,266 - 8,9598
0,6	300	Longo	900	550	15	12,866 - 13,894
0,6	400	Longo	900	550	15	17,825 - 19,331
0,6	500	Longo	900	550	15	23,142 - 25,035
0,6	600	Longo	900	537	15	28,677 - 30,975
0,6	700	Longo	900	527	15	34,356 - 37,007
0,6	800	Longo	900	521	15	39,939 - 43,271
0,6	900	Longo	900	516	15	45,855 - 49,807
0,6	1000	Longo	900	512	15	52,091 - 56,445
0,7	50	Curto	900	550	15	2,2282 - 2,5692
0,7	60	Curto	900	550	15	2,7619 - 3,1756
0,7	100	Curto	900	550	15	4,6841 - 5,2088
0,7	200	Curto	900	550	15	9,965 - 10,848
0,7	300	Curto	900	550	15	16,094 - 17,172
0,7	400	Curto	900	537	15	22,39 - 24,038
0,7	500	Curto	900	523	15	29,034 - 31,195
0,7	600	Curto	900	514	15	35,813 - 39,035
0,7	700	Curto	900	508	15	42,947 - 47,307
0,7	800	Curto	900	502	15	50,236 - 55,391
0,7	900	Curto	900	498	15	57,7 - 64,263
0,7	1000	Curto	900	495	15	65,591 - 72,907
0,7	50	Longo	900	550	15	2,5003 - 2,7176
0,7	60	Longo	900	550	15	2,9523 - 3,2798
0,7	100	Longo	900	550	15	5,1329 - 5,5
0,7	200	Longo	900	550	15	10,6416 - 11,4324
0,7	300	Longo	900	550	15	16,732 - 18,029
0,7	400	Longo	900	550	15	23,237 - 25,02
0,7	500	Longo	900	550	15	30,222 - 32,529
0,7	600	Longo	900	531	15	37,481 - 40,24
0,7	700	Longo	900	523	15	44,844 - 48,296
0,7	800	Longo	900	515	15	52,233 - 56,699
0,7	900	Longo	900	511	15	59,99 - 64,867
0,7	1000	Longo	900	507	15	68,078 - 73,594
0,8	50	Curto	900	550	15	2,7965 - 3,0792
0,8	60	Curto	900	550	15	3,4878 - 3,7299
0,8	100	Curto	900	550	15	5,9532 - 6,4592
0,8	200	Curto	900	550	15	12,591 - 13,496
0,8	300	Curto	900	545	15	20,22 - 21,628
0,8	400	Curto	900	529	15	28,223 - 30,158
0,8	500	Curto	900	516	15	36,652 - 39,196
0,8	600	Curto	900	508	15	45,19 - 49,09
0,8	700	Curto	900	502	15	54,15 - 59,236

$B_{\text{máx}}$ [T]	f [Hz]	Tratamento	Pressão de Compactação [MPa]	Temperatura Máxima [°C]	Tempo de Patamar [minutos]	IP 95% [W/kg]
0,8	800	Curto	900	496	15	63,251 - 69,62
0,8	900	Curto	900	492	15	72,74 - 80,24
0,8	1000	Curto	900	489	15	82,29 - 91,26
0,8	50	Longo	900	550	15	3,0896 - 3,4186
0,8	60	Longo	900	550	15	3,695 - 4,0755
0,8	100	Longo	900	550	15	6,4311 - 6,8458
0,8	200	Longo	900	550	15	13,398 - 14,357
0,8	300	Longo	900	550	15	21,049 - 22,564
0,8	400	Longo	900	550	15	29,07 - 31,419
0,8	500	Longo	900	550	15	37,853 - 40,735
0,8	600	Longo	900	534	15	47,251 - 50,797
0,8	700	Longo	900	523	15	56,615 - 60,94
0,8	800	Longo	900	515	15	66,38 - 71,05
0,8	900	Longo	900	510	15	76,061 - 82,4
0,8	1000	Longo	900	505	15	87,073 - 92,958
0,9	50	Curto	900	550	15	3,4056 - 3,8044
0,9	60	Curto	900	550	15	4,1404 - 4,611
0,9	100	Curto	900	550	15	7,2129 - 7,7974
0,9	200	Curto	900	550	15	15,462 - 16,785
0,9	300	Curto	900	539	15	24,744 - 26,371
0,9	400	Curto	900	524	15	34,425 - 36,615
0,9	500	Curto	900	512	15	44,58 - 47,939
0,9	600	Curto	900	506	15	55,339 - 59,708
0,9	700	Curto	900	499	15	66,351 - 72,261
0,9	800	Curto	900	494	15	77,679 - 84,362
0,9	900	Curto	900	490	15	88,85 - 97,9
0,9	1000	Curto	900	488	15	101,48 - 111,47
0,9	50	Longo	900	550	15	3,8233 - 4,1329
0,9	60	Longo	900	550	15	4,5881 - 5,016
0,9	100	Longo	900	550	15	7,7627 - 8,3159
0,9	200	Longo	900	550	15	16,288 - 17,515
0,9	300	Longo	900	550	15	25,745 - 27,634
0,9	400	Longo	900	550	15	35,78 - 38,347
0,9	500	Longo	900	536	15	46,74 - 50,043
0,9	600	Longo	900	524	15	58,106 - 62,06
0,9	700	Longo	900	514	15	69,587 - 74,476
0,9	800	Longo	900	508	15	81,263 - 87,466
0,9	900	Longo	900	492	15	93,66 - 100,357
0,9	1000	Longo	900	489	15	106,572 - 113,865
1,0	50	Curto	900	550	15	4,1187 - 4,6186
1,0	60	Curto	900	550	15	4,9955 - 5,571
1,0	100	Curto	900	550	15	8,589 - 9,266
1,0	200	Curto	900	550	15	18,859 - 19,794
1,0	300	Curto	900	538	15	29,658 - 31,589
1,0	400	Curto	900	519	15	41,407 - 44,063
1,0	500	Curto	900	510	15	53,633 - 57,629
1,0	600	Curto	900	503	15	66,249 - 71,776
1,0	700	Curto	900	497	15	79,527 - 86,599
1,0	800	Curto	900	492	15	93,12 - 101,45
1,0	900	Curto	900	488	15	106,97 - 117,97
1,0	1000	Curto	900	486	15	121,34 - 134,94
1,0	50	Longo	900	550	15	4,5354 - 4,8987
1,0	60	Longo	900	550	15	5,4205 - 5,8979
1,0	100	Longo	900	550	15	9,3382 - 10,017
1,0	200	Longo	900	550	15	19,586 - 21,107
1,0	300	Longo	900	550	15	30,829 - 33,222
1,0	400	Longo	900	550	15	43,117 - 46,133
1,0	500	Longo	900	532	15	56,208 - 60,067
1,0	600	Longo	900	518	15	69,624 - 74,498
1,0	700	Longo	900	510	15	83,432 - 89,551

B _{máx} [T]	f [Hz]	Tratamento	Pressão de Compactação [MPa]	Temperatura Máxima [°C]	Tempo de Patamar [minutos]	IP 95% [W/kg]
1,0	800	Longo	900	504	15	97,619 - 105,087
1,0	900	Longo	900	490	15	112,229 - 120,664
1,0	1000	Longo	900	487	15	127,82 - 136,57
1,1	50	Curto	900	550	15	4,9252 - 5,4209
1,1	60	Curto	900	550	15	5,8476 - 6,4935
1,1	100	Curto	900	550	15	10,081 - 11,365
1,1	200	Curto	900	550	15	22,044 - 23,588
1,1	300	Curto	900	528	15	35,034 - 37,503
1,1	400	Curto	900	516	15	49,213 - 51,96
1,1	500	Curto	900	506	15	63,356 - 68,098
1,1	600	Curto	900	498	15	78,596 - 84,891
1,1	700	Curto	900	494	15	94,13 - 102,29
1,1	800	Curto	900	490	15	110,12 - 120,91
1,1	900	Curto	900	487	15	126,32 - 140,63
1,1	1000	Curto	900	485	15	143,69 - 159,9
1,1	50	Longo	900	550	15	5,2373 - 5,7184
1,1	60	Longo	900	550	15	6,4419 - 6,9656
1,1	100	Longo	900	550	15	10,971 - 11,813
1,1	200	Longo	900	550	15	23,365 - 24,733
1,1	300	Longo	900	550	15	36,557 - 39,061
1,1	400	Longo	900	550	15	50,793 - 54,456
1,1	500	Longo	900	526	15	66,678 - 71,003
1,1	600	Longo	900	512	15	82,301 - 88,283
1,1	700	Longo	900	491	15	99,247 - 105,667
1,1	800	Longo	900	487	15	115,671 - 124,036
1,1	900	Longo	900	485	15	133,15 - 142,87
1,1	1000	Longo	900	482	15	151,68 - 162,26
1,2	50	Curto	900	550	15	5,6932 - 6,0315
1,2	60	Curto	900	550	15	6,826 - 7,747
1,2	100	Curto	900	550	15	11,974 - 12,787
1,2	200	Curto	900	550	15	25,736 - 27,409
1,2	300	Curto	900	522	15	40,885 - 43,756
1,2	400	Curto	900	512	15	57,329 - 60,835
1,2	500	Curto	900	502	15	73,955 - 79,363
1,2	600	Curto	900	494	15	91,15 - 99,24
1,2	700	Curto	900	491	15	109,93 - 119,55
1,2	800	Curto	900	486	15	128,82 - 141,92
1,2	900	Curto	900	484	15	148,23 - 164,8
1,2	1000	Curto	900	483	15	167,17 - 188,27
1,2	50	Longo	900	550	15	6,164 - 6,7567
1,2	60	Longo	900	550	15	7,405 - 8,0571
1,2	100	Longo	900	550	15	12,748 - 13,665
1,2	200	Longo	900	550	15	27,103 - 28,904
1,2	300	Longo	900	550	15	42,867 - 45,606
1,2	400	Longo	900	538	15	59,865 - 63,724
1,2	500	Longo	900	518	15	77,96 - 82,793
1,2	600	Longo	900	505	15	96,503 - 103,36
1,2	700	Longo	900	498	15	115,575 - 123,938
1,2	800	Longo	900	494	15	135,42 - 145,44
1,2	900	Longo	900	481	15	155,91 - 166,6
1,2	1000	Longo	900	478	15	177,07 - 190,21
1,3	50	Curto	900	550	15	6,589 - 7,471
1,3	60	Curto	900	550	15	7,959 - 9,052
1,3	100	Curto	900	550	15	13,683 - 15,12
1,3	200	Curto	900	541	15	29,892 - 31,505
1,3	300	Curto	900	516	15	47,266 - 50,467
1,3	400	Curto	900	506	15	66,394 - 70,357
1,3	500	Curto	900	498	15	85,132 - 92,005
1,3	600	Curto	900	491	15	105,89 - 114,86
1,3	700	Curto	900	486	15	127,04 - 138,27

B_{\max} [T]	f [Hz]	Tratamento	Pressão de Compactação [MPa]	Temperatura Máxima [°C]	Tempo de Patamar [minutos]	IP 95% [W/kg]
1,3	800	Curto	900	484	15	148,79 - 164,16
1,3	900	Curto	900	483	15	171,37 - 190,23
1,3	1000	Curto	900	480	15	193,86 - 216,17
1,3	50	Longo	900	550	15	7,094 - 7,7005
1,3	60	Longo	900	550	15	8,462 - 9,269
1,3	100	Longo	900	550	15	14,788 - 15,921
1,3	200	Longo	900	550	15	31,291 - 33,089
1,3	300	Longo	900	550	15	49,252 - 52,797
1,3	400	Longo	900	526	15	69,26 - 73,581
1,3	500	Longo	900	507	15	89,826 - 95,777
1,3	600	Longo	900	483	15	111,643 - 118,468
1,3	700	Longo	900	481	15	133,8 - 142,26
1,3	800	Longo	900	479	15	156,41 - 167,16
1,3	900	Longo	900	476	15	179,87 - 193,09
1,3	1000	Longo	900	472	15	206,09 - 220,63
1,4	50	Curto	900	550	15	7,461 - 8,472
1,4	60	Curto	900	550	15	8,779 - 9,711
1,4	100	Curto	900	550	15	15,441 - 17,242
1,4	200	Curto	900	537	15	34,038 - 35,918
1,4	300	Curto	900	515	15	53,874 - 57,493
1,4	400	Curto	900	504	15	75,477 - 79,885
1,4	500	Curto	900	495	15	97,05 - 105,35
1,4	600	Curto	900	490	15	121,02 - 130,82
1,4	700	Curto	900	486	15	145,5 - 160,06
1,4	800	Curto	900	483	15	168,89 - 189,06
1,4	900	Curto	900	481	15	196,33 - 217,63
1,4	1000	Curto	900	478	15	223,04 - 248,21
1,4	50	Longo	900	550	15	8,0332 - 8,5694
1,4	60	Longo	900	550	15	9,6718 - 10,2118
1,4	100	Longo	900	550	15	16,58 - 17,746
1,4	200	Longo	900	550	15	35,731 - 38,047
1,4	300	Longo	900	550	15	57,022 - 59,839
1,4	400	Longo	900	550	15	78,959 - 83,954
1,4	500	Longo	900	499	15	102,821 - 109,167
1,4	600	Longo	900	490	15	127,196 - 135,594
1,4	700	Longo	900	486	15	152,97 - 163,04
1,4	800	Longo	900	471	15	178,41 - 190,93
1,4	900	Longo	900	472	15	205,98 - 221,57
1,4	1000	Longo	900	467	15	234,41 - 253,81
1,5	50	Curto	900	550	15	8,269 - 9,403
1,5	60	Curto	900	550	15	9,574 - 10,925
1,5	100	Curto	900	543	15	17,304 - 19,218
1,5	200	Curto	900	532	15	37,315 - 40,332
1,5	300	Curto	900	510	15	60,353 - 63,851
1,5	400	Curto	900	501	15	84,78 - 90,2
1,5	500	Curto	900	492	15	109,2 - 117,34
1,5	600	Curto	900	485	15	135,57 - 147,6
1,5	700	Curto	900	484	15	164,03 - 180,95
1,5	800	Curto	900	477	15	192,9 - 214,15
1,5	900	Curto	900	478	15	220,56 - 246,98
1,5	1000	Curto	900	477	15	251,72 - 282,24
1,5	50	Longo	900	550	5	8,8993 - 9,6843
1,5	60	Longo	900	550	15	10,547 - 11,874
1,5	100	Longo	900	550	5	18,267 - 20,035
1,5	200	Longo	900	550	15	39,55 - 42,045
1,5	300	Longo	900	550	15	64,088 - 67,342
1,5	400	Longo	900	501	15	88,75 - 93,928
1,5	500	Longo	900	476	15	115,373 - 122,022
1,5	600	Longo	900	484	15	142,94 - 152,42
1,5	700	Longo	900	486	15	171,93 - 184,31

B _{máx}		Tratamento	Pressão de	Temperatura	Tempo de	IP 95% [W/kg]
[T]	f [Hz]		Compactação		Patamar	
			[MPa]	Máxima [°C]	[minutos]	
1,5	800	Longo	900	478	15	202,33 - 217,63
1,5	900	Longo	900	478	15	234,29 - 253,93
1,5	1000	Longo	900	474	15	267,95 - 290,19